



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

SYNTETICKÁ A ALTERNATIVNÍ PALIVA PRO SPALOVACÍ MOTORY

SYNTHETIC AND ALTERNATIVE FUELS FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Miloš Kromp

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michael Böhm

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Miloš Kromp
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	Ing. Michael Böhm
Akademický rok:	2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Syntetická a alternativní paliva pro spalovací motory

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

S příchodem emisní normy EURO 7 je značná pozornost věnována syntetickým a alternativním palivům. Jejich použití přispívá ke snižování celkových emisí CO₂.

Práce převážně rešeršního charakteru se zaměřuje na jednotlivé typy paliv, jejich výrobu a distribuci. Dále jejich vlivu na spalování a výkonové parametry motoru. V neposlední řadě je uveden popis metodiky vyhodnocování emisí CO₂ u vozidel při použití alternativních paliv.

Praktická část zahrnuje základní simulace (například v prostředí GT–Suite) pro porovnání výkonových parametrů motoru při použití těchto paliv.

Cíle bakalářské práce:

Popis jednotlivých druhů a typů paliv.

Výroba a distribuce.

Vliv paliv na spalování a výkonové parametry motoru.

Metodika vyhodnocování emisí CO₂.

Simulační model motoru.

Seznam doporučené literatury:

KIRKPATRICK, Allan T. a Colin R. FERGUSON. Internal combustion engines: applied thermosciences. Third. United Kingdom: John Wiley, 2016. ISBN 978-1-118-53331-4.

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

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

HEYWOOD, John, HABENICHT, Rudolph E., ed. John Heywood's a dialogue of proverbs. Berkley: University of California, 1963.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zaměřuje na syntetická a alternativní paliva pro spalovací motory. Jsou zkoumány typy paliv, procesy výroby a distribuce a jejich vliv na spalování a výkon motoru. Práce dále analyzuje dopady těchto paliv na emise CO₂. Inovativní součástí je využití simulačního modelu motoru, který umožňuje porovnání výkonových parametrů a emisí při použití různých typů paliv. Tato metoda přináší nové možnosti pro optimalizaci využití alternativních paliv.

KLÍČOVÁ SLOVA

syntetická paliva, alternativní paliva, emise CO₂, spalovací motory

ABSTRACT

The bachelor's thesis focuses on synthetic and alternative fuels for combustion engines. Types of fuels, production and distribution processes, and their impact on combustion and engine performance are examined. The work also analyzes the impacts of these fuels on CO₂ emissions. An innovative part is the usage of a simulation model of the engine, which allows comparison of performance parameters and emissions when using different types of fuels. This method brings new possibilities for optimizing the use of alternative fuels.

KEYWORDS

synthetic fuels, alternative fuels, CO₂ emissions, internal combustion engines

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KROMP, M. *Syntetická a alternativní paliva pro spalovací motory*. Brno, 2024. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Michael Böhm. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157403>.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Michaela Böhma a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 24. května 2024

.....

Miloš Kromp

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Michaelu Böhmovi za jeho cenné rady a poskytnutou pomoc k vypracování práce. Rovněž děkuji své rodině a svým nejbližším za podporu během studia.

OBSAH

Úvod	11
1 Spalovací motory	12
2 Běžně používaná paliva	15
2.1 Benzin	15
2.2 Nafta.....	16
2.3 Požadavky kladené na konvenční paliva	17
2.3.1 Oktanové číslo	17
2.3.2 Cetanové číslo	17
3 Historická paliva.....	19
3.1 Svítiplyn.....	19
3.2 Dřevoplyn	19
4 Přehled současných alternativních paliv	21
4.1 Alternativní paliva pro zážehové motory.....	21
4.1.1 LPG.....	21
4.1.2 Zemní plyn.....	23
4.1.3 Bioethanol.....	25
4.1.4 Biomethanol	28
4.1.5 Bioplyn (biometan).....	30
4.2 Alternativní paliva pro vznětové motory	32
4.2.1 Bionafta	32
4.3 Biobutanol.....	34
4.4 Vodík	35
5 Přehled současných syntetických paliv	37
5.1 Syntetický plyn	37
5.2 Syntetická ropa	38
5.3 Syntetický benzin.....	39
5.4 Syntetický diesel	41
5.5 Dimethylether	41
6 Metodika vyhodnocování emisí CO₂.....	43
6.1 Skleníkové plyny	43
6.2 Emise spalovacích motorů	44
6.3 Vyhodnocování emisí spalovacích motorů.....	45
7 Analýza vlivu alternativních a syntetických paliv na spalování a výkon motoru	47
7.1 Simulační modely	47
7.2 Spalování v zážehovém motoru	49
7.2.1 Spalování benzínu	49
7.2.2 Spalování LPG.....	51
7.2.3 Spalování CNG.....	52
7.2.4 Spalování bioplynu	54
7.2.5 Spalování směsi benzínu s ethanolem / methanolem	54
7.2.6 Spalování biobutanolu	56

7.2.7	Spalování vodíku.....	57
7.2.8	Spalování syntetického benzínu.....	57
7.3	Spalování ve vznětovém motoru	57
7.3.1	Spalování nafty	57
7.3.2	Spalování bionafty	59
7.3.3	Spalování syndieselu.....	59
7.3.4	Spalování biobutanolu.....	59
7.3.5	Spalování směsi nafty s methanolem	59
7.3.6	Spalování DME.....	60
8	Analýza výsledků simulace.....	63
8.1	Výsledky simulací zážehového motoru.....	63
8.2	Výsledky simulací vznětového motoru	66
	Závěr	70
	Použité informační zdroje	71
	Seznam použitých zkratk a symbolů	80

ÚVOD

V souvislosti s neustálým vývojem automobilového průmyslu a dopravního sektoru a se zvyšujícím se zájmem o ekologii a snižování emisí skleníkových plynů získávají syntetická a alternativní paliva stále větší význam. Také s blížící se implementací emisní normy EURO 7 se tato témata stávají klíčovým prvkem ve snaze o dosažení udržitelnějšího a ekologičtějšího provozu spalovacích motorů.

Cílem této bakalářské práce je provedení detailní rešerše v oblasti syntetických a alternativních paliv pro spalovací motory s důrazem na jejich fyzikální a chemické vlastnosti, výrobu a vliv na celkové emise. Práce je také zaměřena na analýzu dopadu těchto paliv na spalování a výkonné parametry spalovacího motoru s cílem posoudit jejich schopnost přispět k ekologickým cílům.

V teoretické části práce bude proveden podrobný popis jednotlivých typů alternativních a syntetických paliv, včetně jejich výhod a omezení. Dále bude zkoumána i jejich výroba. Rešerše se také zaměří na metodiku vyhodnocování emisí CO₂ u vozidel používající alternativní paliva, neboť je to klíčový faktor v kontextu současných environmentálních standardů.

V praktické části práce budou provedeny základní simulace v prostředí programu GT-Suite s cílem porovnat charakteristiky motorů při použití syntetických a alternativních paliv. Tato porovnání poté budou poskytovat konkrétní data a poznatky o využitelnosti daných paliv, a také jakým způsobem ovlivňují jednotlivé typy chování motoru v praxi.

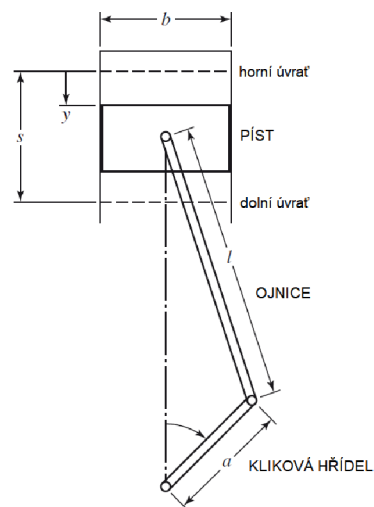
Celkovým záměrem této bakalářské práce je poskytnout komplexní pohled na význam a potenciál syntetických a alternativních paliv v kontextu nových emisních standardů, a tím přispět k diskuzi o udržitelnější budoucnosti automobilového průmyslu.

1 SPALOVACÍ MOTORY

První spalovací motor na světě vynalezl v šedesátých letech 19. století francouzský vynálezce Étienne Lenoir, tehdy byl poháněn dnes již nevyužívaným svítiplynem. Stejným palivem byl plněn první čtyřdobý motor vyrobený německým konstruktérem Nicolausem Ottem o deset let později. Až s konstrukcí prvního benzínového motoru německého automobilového konstruktéra Karla Benze se začala využívat kapalná paliva, která na nadcházejících sto let naprosto vytěsnila použití plyných paliv [1]. Samotný spalovací motor byl základem pro mnohé úspěšné vynálezy v mnoha odvětvích – kupříkladu v přepravě materiálu, zboží či lidí, čímž umožnil zdokonalení automobilů, nákladních vozidel, letadel, vlaků či lodí. Přizpůsobivost a možnost užití spalovacích motorů v různých aplikacích vyústilo z jejich poměrně nízké ceny, výhodnému poměru výkonu vůči hmotnosti a relativně vysoké účinnosti.

Po mnoho let byly spalovací motory vyvíjeny za účelem vylepšování výkonu, a přitom snižování hmotnosti, hluku a vibrací. Díky tomuto neustálému vývoji byla zvýšena termická účinnost z původních 10–20 % na začátku 20. století na současnou hodnotu téměř 50 % [2].

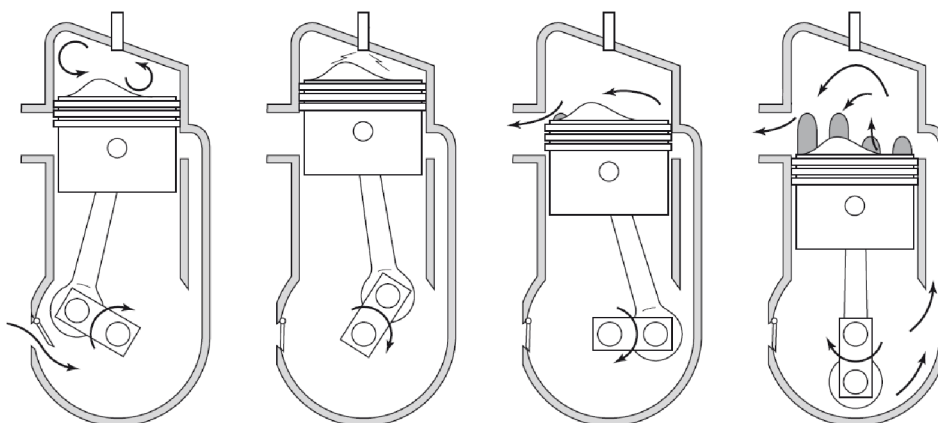
V současné době jsou na světě nejrozšířenější motory využívající klikový mechanismus a ventilový rozvod s písty pohybujícími se přímočarým vratným pohybem. Klikový mechanismus, uvedený na obr. 1, se skládá z klikové hřídele (parametr a označuje vzdálenost mezi středem hřídele a středem ojníčního čepu), ojnice (parametr l označuje délku ojnice), pístu (parametr y označuje posunutí pístu vzhledem ke dnu válce) a válce (parametr b označuje vrtání neboli průměr válce).



Obr. 1: Klikový mechanismus spalovacích motorů [2]

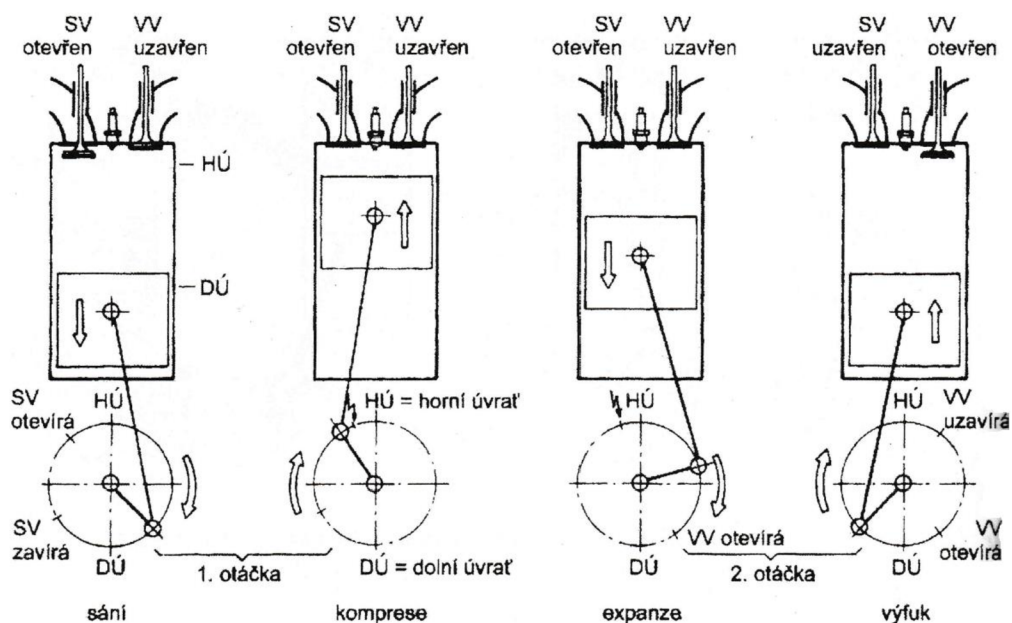
Využívá se pro přeměnu přímočarého vratného pohybu pístu na otáčivý pohyb klikové hřídele, jež poté přes převodové a rozvodové ústrojí automobilu pohybuje kola vozidla.

Spalovací motory lze dělit dle způsobu činnosti, respektive dle počtu zdvihů připadajících na jeden pracovní cyklus motoru, na motory dvoudobé a čtyřdobé. U motorů dvoudobých probíhá pracovní oběh motoru během dvou zdvihů pístu, tedy v průběhu jedné otáčky klikového hřídele, pracovní cyklus se uskutečňuje nad pístem či pod ním, viz obr. 2.



Obr. 2: Pracovní cyklus dvoudobého zážehového motoru: zleva – sání pod pístem a komprese nad pístem; zažehnutí směsi a následné hoření nad pístem; započetí výfuku s ještě uzavřeným sacím kanálem; vytlačování spalin čerstvou směsí [2]

Pracovní oběh čtyřdobého motoru probíhá během dvou otáček klikové hřídele a skládá se ze čtyř po sobě jdoucích fází: sání, komprese, expanze a výfuk. Na rozdíl od dvoudobého motoru se pracovní cyklus uskutečňuje pouze nad pístem, přísun paliva a odvod spalovaných plynů po spalování je zajištěn ventily ovládanými vačkovou hřídelí. Popis cyklů čtyřdobého motoru je znázorněn na obr. 3.

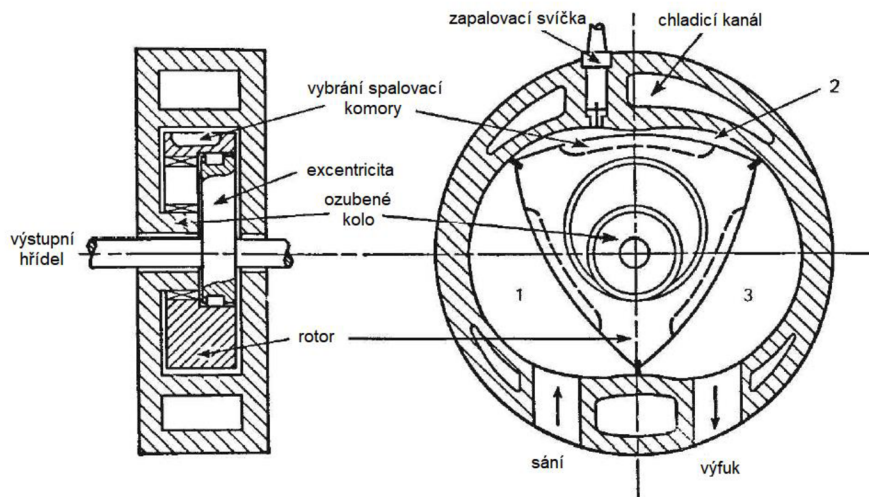


Obr. 3: Čtyři doby jednoho pracovního cyklu čtyřdobého spalovacího motoru, HÚ = horní úvrať, DÚ = dolní úvrať, SV = sací ventil, VV = výfukový ventil [3]

Čtyřdobé motory u osobních aut dominují díky vyšší účinnosti a také schopnosti splňovat stále se zpřísnující emisní normy, neboť při spalování není u čtyřdobých motorů využívána směs paliva s olejem, jako je tomu u motorů dvoudobých, a tak je spalování mnohem čistší a ekologičtější [3].

Zvláštním a speciálním typem motoru je například Wankelův motor (schéma na obr. 4), což je označení pro motor s kruhovým pohybem pístu, jenž vyrobil vynálezce Felix Wankel. Využívá trojúhelníkového tvaru pístu. Pro efektivní užití tohoto typu motoru jsou nutná těsnění mezi

strany rotoru a krytu motoru a hlavně také těsnění na zaoblených rozích samotného trojúhelníkového pístu. Problémy s těsněním, přetrvávající dodnes, však zapříčinily nepřílišné využití tohoto typu motoru. Za výhody Wankelova motoru se považuje jeho kompaktnost, relativní jednoduchost a možnost využití při vysokých otáčkách, naopak hlavní nevýhody je jeho nízká účinnost způsobená limitací kompresních poměrů a vysoké hodnoty emisí, jež jsou ovlivněny nevhodným tvarem spalovacího prostoru a profukem plynu přes těsnění [4].



Obr. 4: Wankelův motor [4]

Dalším důležitým hlediskem při konstrukci motoru je velikost a tvar spalovacího prostoru (combustion chamber). Ta je tvořena tvarem hlavy válce a pístu, ovlivněna je také polohou zapalovací svíčky (pokud se jedná o zážehový motor) a sacího a výfukového ventilu. Tvar tohoto prostoru je pro celý motor zásadní a je podmíněn požadavky ovlivňující kvalitu spalování a tím pádem celý podávaný výkon motoru. Jsou jimi dosažení co nejmenšího povrchu, neboť u menšího povrchu dochází k menšímu přenosu tepla, tedy nižším tepelným ztrátám a vyšší termické účinnosti motoru, a také dosažení optimální doby spalování; není však pravidlem, že čím kratší doba spalování, tím lépe, neboť může docházet k detonačnímu spalování – samovznícení paliva (více v kapitole 2.3.1) [5].

2 BĚŽNĚ POUŽÍVANÁ PALIVA

Jako konvenční paliva používaná pro pístové spalovací motory jsou v současnosti nejvíce používána benzin a nafta. Jedná se o kapalná uhlovodíková paliva, jež jsou chemickými postupy vyráběna z ropy jako její deriváty. Ropou je myšlena směs složená z přibližně 84 % uhlíku (C), 14 % vodíku (H), 1–3 % síry (S) a méně než 1 % dusíku (N), oxidů, kovů a solí. Surová ropa se skládá z vysoké škály uhlovodíků, jež sestávají z alkanů, alkenů (olefinů), cykloalkanů a arenů. Vzhledem k častému výskytu velmi velkých molekul ve struktuře (např. těžká ropa, asfalt) je nutná frakční destilace (proces přeměny kapalné látky na plynnou a poté kondenzací zpátky na kapalnou za účelem separace kapalin od netěkavých látek [6]). Výsledkem destilace jsou ropné deriváty jako ropný plyn, kerosin pro tryskové motory, benzin, nafta, mazut, mazadla, asfalt aj. Benzin je získáván při destilaci při teplotách mezi 40 a 200 °C, diesel při teplotách 200 až 425 °C [7].

2.1 BENZIN

Automobilový benzin je směsí kapalných uhlovodíků s bodem varu v rozmezí 30 až 210 °C. Přibližná hustota benzínu se pohybuje kolem 700–800 kg/m³ [7]. Toto palivo využívané v zážehových spalovacích motorech musí pro správný chod motoru splňovat různé požadavky, například dobrou odpařitelnost za nízkých teplot (tato vlastnost zajišťuje možnost startu studeného motoru); malý obsah síry, neboť způsobuje korozi palivového systému a také snižuje oktanové číslo; správnou úroveň těkavosti, kdy příliš malá těkavost negativně ovlivňuje vznik správné směsi paliva se vzduchem a naopak příliš velká těkavost může dokonce zabránit proudění paliva vytvořením bublin páry v sacím systému se zvyšující se teplotou [7]; či dlouhodobou stabilitu, jež umožňuje palivo skladovat bez větších ztrát za delší časový interval [8]. V tab. 1 jsou uvedeny hlavní vlastnosti benzínu.

Tab. 1: Fyzikální a chemické vlastnosti benzínu [7], [9]

	Jednotka	Hodnota
Chemické složení	-	C ₅ –C ₁₂
Hustota (15 °C, 101,3 kPa)	kg/m ³	700–800
Bod varu (101,3 kPa)	°C	35–140
Výhřevnost	MJ/kg	44–46
Teplota vznícení	°C	247–280
Tlak par dle Reida	kPa	55–95
Oktanové číslo	-	90–95
Cetanové číslo	-	5–20
Stechiometrický poměr	-	14,7 : 1
Kinematická viskozita (20 °C, 101,3 kPa)	mm ² /s	0,4–0,8

Dříve bylo běžné přidávání olova jako aditiva do benzínu, neboť mělo výborné mazací účinky zejména u ventilů a také zvyšovalo oktanové číslo, s nástupem emisní normy EURO 1 v roce 1992 byl však povinně do výfukového systému zaveden katalyzátor, vozidla s tímto zařízením však vyžadovala bezolovnatý benzin, a proto se v dnešní době mezi konvenčními palivy využívá benzin s minimálním obsahem olova (max 13 mg/l) – olovo také významně škodilo životnímu prostředí a lidskému zdraví [8]. Musela být proto nalezena jiná aditiva zvyšující oktanové číslo (viz kapitola 2.3.1). Dalšími aditivy zvyšujícími kvalitu benzínu a starající se o jeho trvanlivost jsou například detergenty (angl. detergents) nebo také tenzidy, jež mají za úkol

omezovat vznik uhlíkatých usazenin, které například u motorů s přímým vstřikováním vznikají po nástřiku paliva v zadních částech trysek. Nejběžnějšími detergenty jsou aditiva na bázi aminu, například polybutenamin (PBA), polytheramin (PEA) či polyisobutylenamin (PIBA) [10]. Důležitá jsou také antioxidační aditiva, která zabraňují nenasyčeným uhlovodíkům (tzv. olefinům) v oxidaci, ke které jsou náchylné. Produkty oxidace mohou měnit velikosti otvorů ve vstřikování a tím omezovat množství vstřikovaného paliva do spalovacího prostoru. Antioxidačními aditivami mohou být například alkylfenoly [4].

2.2 NAFTA

Motorová nafta neboli diesel je směs ropných kapalných uhlovodíků s bodem varu v rozmezí 150–360 °C a hustotou pohybující se kolem 830–950 kg/m³ [7]. Stejně jako u benzínu, také u nafty jsou důležité některé požadavky pro správné fungování vznětového motoru, například destilace, správná hustota a viskozita, cetanové číslo a index, korozivnost a čistota. Při nízkých teplotách může docházet díky tuhnutí těžkých složek nafty ke snížení filtrovatelnosti paliva, proto je normami definován tzv. CFPP (cold filter plugging point) – bod „ucpání filtru“ za nízkých teplot, jenž stanovuje nejnižší možnou teplotu, při které ještě palivo dokáže protéct filtračním zařízením vozidla za specifikovaný čas [4]. S vlastností CFPP také souvisí tzv. teplota vylučování parafinů – „cloud point“. Při této teplotě se v naftě začínají vylučovat parafiny, jež zapříčiňují kalnost paliva a usazují se na filtračním zařízení [8]. Klíčové vlastnosti jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2: Fyzikální a chemické vlastnosti nafty [7], [9]

	Jednotka	Hodnota
Chemické složení	-	C ₁₀ –C ₂₆
Hustota (15 °C, 101,3 kPa)	kg/m ³	830–950
Bod varu (101,3 kPa)	°C	240–360
Cloud point	°C	–8
CFPP	°C	–20–0
Výhřevnost	MJ/kg	42–43
Teplota vznícení	°C	210–250
Oktanové číslo	-	20–30
Cetanové číslo	-	40–55
Kinematická viskozita (20 °C, 101,3 kPa)	mm ² /s	1,9–4,1

Důležitými aditivami zlepšujícími vlastnosti nafty jsou aditiva zvyšující cetanové číslo (viz kapitola 2.3.2), depresanty, aditiva zvyšující mazivost, detergenty, aditiva zabraňující námraze a biocidy. Depresanty (angl. anti-waxing additive) souvisí s výše zmiňovanými pojmy cloud point a CFPP, neboť se používají ke zmenšení rizika ucpání filtračních zařízení za chladnějších období. Nezabraňují vzniku krystalků parafinu, ale pracují na základě modifikací tvarů krystalků na dendritickou strukturu, která snadněji projde přes filtrační systém a nezablokuje průchod kapalného paliva. Běžně prodávané depresanty se skládají z kopolymerů etylenu či vinylacetátu [4]. Aditiva zvyšující mazivost jsou nutná z hlediska nízkého obsahu síry, která má sice pozitivní účinky na mazivost paliva, její podíl na vzniku koroze u palivové a vstřikovací soustavy je však příliš závažný. Základem složení těchto aditiv jsou estery [8]. Detergenty, stejně jako u benzínových aditiv, zabraňují vzniku uhlíkatých usazenin ve vstřikovací soustavě. Používají se aditiva na základě aminů a amidů. Aditiva zabraňující námraze jsou využívány pro

zmenšení rizika vzniku ledových krystalků vody, která se do paliva dostala jako vlhkost z okolního vzduchu po snížení venkovní teploty. Využívají se látky s velkou afinitou k vodě, např. alkoholy či glykoly. Posledními zmiňovanými aditivy jsou biocidy, jež slouží k odstranění množících se anaerobních bakterií vyskytujících se v palivových nádržích a schopných zablokovat filtrační soustavu motoru [4].

2.3 POŽADAVKY KLADENÉ NA KONVENČNÍ PALIVA

Za předpokladu užití paliv ve spalovacích motorech jsou důležité jejich fyzikální a chemické vlastnosti jako například relativní hustota, teplota vznícení či teplota hoření, viskozita, povrchové napětí, teplota tuhnutí, zachování tekutosti za nízkých teplot. Konkrétní vlastnosti závisí na druhu paliva a typu použitého spalování, například u benzínu jsou jedny z jeho nejdůležitějších vlastností těkavost a odolnost vůči vzniku detonačnímu spalování, u dieselu zase naopak viskozita, povrchové napětí a sklon ke vznícení [7].

Jedním z hlavních požadavků na kvalitu paliv je jejich hluboké odsíření, znamenající téměř nulový obsah síry v palivu. Síra obsažená v palivu způsobuje v palivové soustavě korozi za studena a také korozi produkty spalování, jimiž jsou oxid siřový a siřičitý. Zároveň významně zvyšuje škodlivé emise výfukových plynů. Dále lze zmínit požadavky na snižování obsahu aromatických uhlovodíků, které nezanedbatelným způsobem zvyšují výskyt CO₂ v emisích. U benzínu je zapotřebí kontrolovat obsahové hodnoty olefinů a aromátů, u nafty lze v kontextu snižování emisí hovořit o snižování koncové teploty destilace [8].

2.3.1 OKTANOVÉ ČÍSLO

Oktanové číslo (OČ) paliva určuje jeho antidetonační odolnost – tedy rezistivitu vůči detonačnímu spalování („klepání motoru“, samozápal). Detonační spalování je samovznícení směsi ve válci kvůli příliš vysoké teplotě a tlaku, hoření je nehomogenní a v nevhodnou dobu, zároveň vytváří rázové vlny a celkově působí negativně na průběh spalování [7]. Oktanové číslo je definováno jako objemové procento izooktanu ve směsi s n-heptanem vykazující ve zkušebním motoru stejnou odolnost vůči detonačnímu spalování jako zkoušené palivo – čistý n-heptan má OČ = 0, izooktan OČ = 100. Například oktanové číslo 95 (kupříkladu Natural 95) znamená, že dané palivo je odolné vůči detonačnímu spalování stejně jako směs skládající se z 95 obj. % izooktanu a 5 obj. % n-heptanu [8].

Čistý benzin má poměrně nízké oktanové číslo, proto jsou do něj přidávána aditiva – tzv. antidetonátory, která OČ zvyšují. Předpoklady pro správnou funkci těchto aditiv jsou převod aktivních látek (radikálů) na „netečné“ radikály a podpora slučování radikálů, čímž snižují jejich iniciační účinek. Mezi běžná antidetonační činidla se řadí například toluen v kombinaci s benzenem a xylenem [11], tetraethylolovo, jenž je v současnosti nahrazováno netoxickým ferrocenem – s ním je však spojen problém vzniku usazenin způsobujících zkrácení životnosti zapalovacích svíček [12]; methyl terciární butylether (MTBE), jenž je také vyráběn pro další průmyslové účely (o něm podrobněji v kapitole 4.1.4) [13] a monomethylanilin (MMA). Kromě ferrocenu, který se spaluje společně s benzinem, není znám žádný další nejedovatý účinný antidetonátor, jenž by splňoval podmínku ekologické výroby.

2.3.2 CETANOVÉ ČÍSLO

Ekvivalentem oktanového čísla je u dieselu používané tzv. cetanové číslo (CČ), jenž charakterizuje kvalitu nafty a určuje průběh spalování nafty ve válci – tzv. prodlevu vznícení. Čím vyšší cetanové číslo, tím kratší prodleva vznícení, nárůst tlaku ve válci není tak náhlý a spalování je

čistší a tišší [8]. Cetanové číslo je definováno jako objemové procento n-cetanu ve směsi s α -methylnaftalenem, kdy hodnota $CC = 0$ je přiřazena α -methylnaftalenu, neboť má špatnou schopnost samovznícení, a n-cetanu je přiřazena hodnota $CC = 100$; tedy nafta s cetanovým číslem 65 má prodlevu vznícení ekvivalentní prodlevě vznícení směsi s 65 obj. % n-cetanu a 35 obj. % α -methylnaftalenu. Nověji je používán isocetan (heptamethylnonan, HMN) jako spodní hranice stupnice s hodnotou $CC = 15$ [4].

Příliš nízké cetanové číslo způsobuje dlouhou prodlevu vznícení a s tím spojený nárůst spotřeby a hluku motoru. V tomto případě se mluví o tzv. „tvrdém chodu“ motoru. Naproti tomu u příliš vysokého cetanového čísla je prodleva vznícení krátká, palivo začíná hořet dříve a v těsné blízkosti u trysky, díky tomu je nedostatečně promíseno se vzduchem a dochází k nedokonalému hoření, přičemž vznikají saze. Z těchto důvodů dosahují běžně využívaná paliva hodnoty CC v rozmezí 49–62, minimální cetanové číslo pro naftu je 45 [8].

Aditiva zvyšující cetanové číslo paliva jsou nazývána urychlovače vznícení. Nejčastějšími přísadami jsou aditiva obsahující 2-ethylhexyl nitrát, zde však může docházet kvůli výskytu dusíku ke vzniku oxidů dusíku (NO_x), jež je v emisích spalovacích motorů nutno co nejvíce eliminovat, proto se často namísto této sloučeniny používá peroxidů [4].

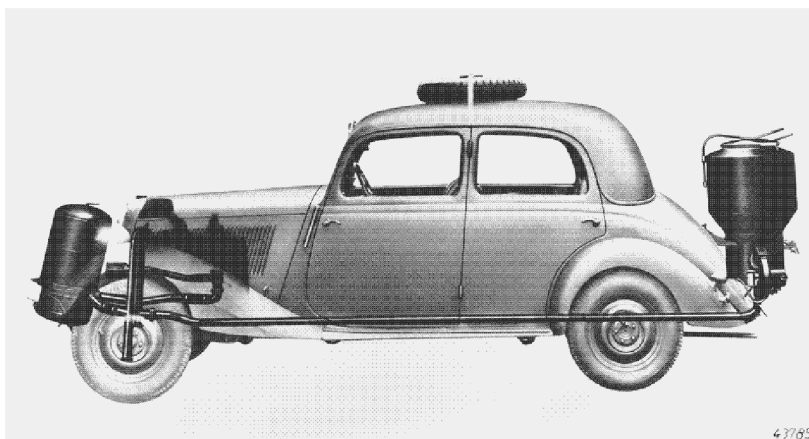
3 HISTORICKÁ PALIVA

3.1 SVÍTIPLYN

Svítiplýn byl využíván především ke svícení a k výrobě tepla v 19. a ještě ve 20. století, zároveň to bylo také první palivo použité ve spalovacím motoru vynálezcem Étienne Lenoirem [1]. Samotný svítiplýn se v přírodě běžně nevyskytuje, je získáván uměle tlakovým zplyňováním hnědého uhlí kyslíkem a vodní parou. Jedná se o směs vodíku (H), metanu (CH₄), dusíku (N), oxidu uhelnatého (CO), v malé míře také oxidu uhličitého (CO₂) – svítiplýn je v podstatě obdobou koksárenského plynu, jenž také vzniká při karbonizaci. Ve druhé polovině 20. století byl svítiplýn postupně vytlačen bezpečnějším a stále více dostupnějším a levnějším zemním plynem, jenž se nemusel uměle vyrábět [14]. V dnešní době však stále existují země, které svítiplýn stále používají, jedná se především o státy s velkými zásobami uhlí a malými zásobami zemního plynu – Čína, Hong Kong, využití se však týká výhradně ohřevu vody a vytápění. Vzhledem k emisím bylo změřeno, že za každý rok bylo při výrobě a použití svítiplýnu do ovzduší vypuštěno přes 1,5 Mt CO₂ [15].

3.2 DŘEVOPLYN

Dřevoplyn je syntetické plynové palivo na bázi oxidu uhelnatého. Na jeho výrobu bylo nejčastěji využíváno dřevo či jiné formy biomasy za pomoci dřevoplynového generátoru – shora plněný kotel, v němž bylo nedokonale spalováno dřevo či koks. Uhlík (C) za vysokých teplot nad 500 °C zde reaguje s parou a kyslíkem. Vzniká směs oxidu uhelnatého (CO), vodíku (H), metanu (CH₄) a oxidu uhličitého (CO₂), která po ochlazení může být spalována ve spalovacím prostoru motoru v prostředí bohatém na kyslík [16].



Obr. 5: Automobil s pohonem na dřevoplyn [17]

Dřevoplyn lze bez větších problémů používat na pohon u většiny vozidel s běžným spalovacím motorem. Instalace dřevoplynového generátoru s sebou nese určitou investici, zvýšení nákladů kvůli vyšší potřebě údržby stroje a snížení výkonu. Z těchto důvodů se pro provozovatele vyplatí přejít na dřevoplyn za předpokladů velkého vytížení daného vozidla a také například velkého cenového rozdílu mezi běžnými palivy a dřevem. Zážehový motor lze s dřevoplynovým generátorem využívat na pohon dřevoplynem v podstatě bez velkých vnějších zásahů. Vznětový motor lze poté využívat na dřevoplyn dvěma způsoby. Prvním je částečná přestavba na motor se zapalováním takovou úpravou hlavy válce, aby v ní mohla být umístěna zapalovací svíčka a použití speciálních pístů poskytujících menší kompresní poměr. Efektivita prvního způsobu byla testy změřena jako značně nízká a v podstatě se jednalo o přestavbu vznětového

motoru na zážehový. Druhý způsob využívá vznětových motorů s přímým vstřikováním, kde je zachován původní naftový motor využívaný převážně ke startu, po němž je již používán dřevoplyn [18]. Samozřejmostí je u všech zmíněných typů motorů doplnění celé konstrukce o systémy zplyňování, tedy dřevoplynovým generátorem, viz obr. 5.

Během zplyňování dřeva či jiné biomasy vzniká popel a kondenzát (výhradně vodní), jež bývá znečištěn dehtem a fenoly – velkými znečišťovateli životního prostředí a také zdravotním rizikem. Tyto problémy mohou být částečně odstraněny použitím filtrů v dřevoplynovém generátoru. Při spalování dřevoplynu v motoru vzniká oxid uhelnatý, jenž je velice toxický a nebezpečný. Nejrizikovější situace při provozování motoru na dřevoplyn nastává při jeho startu, kdy dochází k odvětrávání plynů a tím pádem jejich největšímu rozptýlení do ovzduší, proto bylo vhodné používat výfuk v podobě komínu [18].

Používání motorů na dřevoplyn mělo v součtu více negativ než pozitiv. Výkon byl nízký (oproti benzínu i o 20 %) a hlavně nestálý, motory byly znečišťovány dehtem a pevnými částicemi, čímž se zvyšovalo jejich opotřebení. Největším rizikem jsou však již zmiňované produkované emise poškozující životní prostředí a nebezpečné pro živé organismy [16].

4 PŘEHLED SOUČASNÝCH ALTERNATIVNÍCH PALIV

V současnosti jsou nejvyužívanějšími palivy v dopravě benzin a nafta, kterážto jsou považována za paliva konvenční. S čím dál větším množstvím dopravních prostředků však stoupá i poptávka po palivech dalších, nezávislých na výskytu ropy či tolik nezatěžujících přírodní prostředí emisemi a škodlivými látkami.

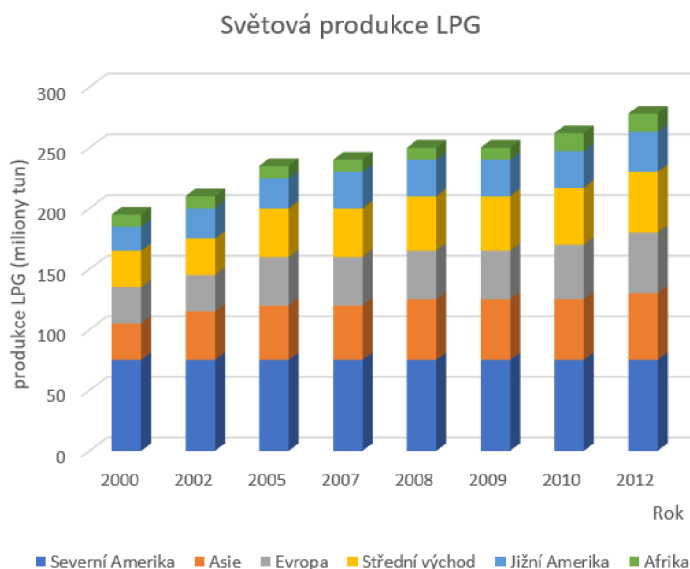
Využití alternativních paliv v dopravě v drtivé většině případů znamená snížení emisí a znečištění prostředí. Tyto pozitivní dopady využívání alternativ oproti konvenčním palivům vyvolávají otázku, proč se již dávno k jejich používání nepřešlo. Z ekonomického hlediska však alternativy nevycházejí příliš dobře, neboť cena alternativních paliv může být vyšší než u paliv konvenčních, zároveň také možná získaná energie na jednotku objemu paliva může být u alternativních nižší než u těch běžných [2]. Zároveň je také nutné vybudování nové infrastruktury, jež by zajišťovala přísun alternativních paliv k uživatelům, a ne vždy lze použít stejných cest, jaké se dnes používají pro přepravu konvenčních paliv. Tyto nevýhody alternativních paliv jsou jedny z hlavních příčin, proč jsou ropná paliva stále masově využívána, i když mají prokazatelný dopad na životní prostředí.

4.1 ALTERNATIVNÍ PALIVA PRO ZÁŽEHOVÉ MOTORY

Alternativy paliv pro zážehové motory lze rozdělit dle jejich skupenství na plynná a kapalná. Plynná paliva jsou poté zemní plyn, propan-butan, bioplyn či vodík, za kapalná paliva lze považovat ethanol či methanol.

4.1.1 LPG

Propan-butan, nazývaný také zkapalněný ropný plyn – LPG, (angl. liquefied petroleum gas) je směsí plynů propanu (C_3H_8) a butanu (C_4H_{10}), někdy také propanu a ethanu (C_2H_6). Zkapalněný ropný plyn vzniká při těžbě ropy nebo zemního plynu jako vedlejší produkt.



Obr. 6: Grafické znázornění světové produkce LPG mezi lety 2000–2012 [1]

LPG má ve světě na 1000 různých možností použití zahrnujících zemědělství, civilní inženýrství, městskou ekonomiku, domácnosti a dopravu. Globální produkce tohoto produktu se ročně

blíží k hodnotě 280 milionů tun [1], viz obr. 6. V současnosti se množství automobilů poháněných LPG pohybuje kolem 28,3 milionů po celém světě [19].

FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÉ VLASTNOSTI

LPG je velmi těkavá hořlavá kapalina, jež obsahuje minimální množství nečistot (např. síry). Jedná se o nasycené uhlovodíkové plyny s nulovým obsahem benzenových uhlovodíků. Zkapalněné se jeví jako bezbarvá kapalina specifického zápachu, není toxická, její páry však mohou mít narkotické účinky a způsobovat bolesti hlavy, nevolnost či dráždění očí a dýchacích cest [20]. Ropný plyn je získáván při rafinaci ropy nebo při těžbě zemního plynu jako kapalná frakce oddělená od metanu. Čisté LPG neobsahuje žádné nenasyčené uhlovodíky, což z něj dělá palivo poměrně vysoké kvality a vysoké chemické stability [1]. Při atmosférickém tlaku a běžných venkovních teplotách je LPG ve stavu plynném, jeho nesporně výhodná vlastnost však dovoluje poměrně snadno převést plyn do kapalného stavu buď ochlazením, nebo stlačením. Ve stavu kapalném zabírá oproti plynnému pouze 1/260 svého objemu. V plynném stavu je těžší než vzduch, při náhodném úniku plynu leží při zemi a z toho důvodu mají vozidla s pohonem na LPG zákaz vjezdu do podzemních garáží, neboť by při možném úniku do okolního prostředí mohl způsobit otravu lidí [8]. Při expanzi kapalného LPG do prostoru dochází kvůli rapidnímu odpařování k velkému ochlazení kapaliny (až $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$), což může mít za následek vznik omrzlin. Stále je však i při těchto vlastnostech velmi výhodný, i proto je na světě nejpoužívanějším alternativním palivem, s ohlednutím na data z roku 2015 [2]. Fyzikální vlastnosti hlavních složek LPG uvádí tab. 3.

Tab. 3: Fyzikální a chemické vlastnosti propanu a butanu [8], [20]

	Jednotka	Propan	Butan	Benzin
Chemický vzorec	-	C_3H_8	C_4H_{10}	$\text{C}_5\text{--}\text{C}_{12}$
Hustota kapalná fáze ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 101 kPa)	kg/m^3	498	578	700–800
Hustota plynná fáze ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 101 kPa)	kg/m^3	2,02	2,59	-
Bod varu (101,3 kPa)	$^{\circ}\text{C}$	-42,6	-0,5	35–140
Bod tání (101,3 kPa)	$^{\circ}\text{C}$	-190,2	-135,0	pod -40
Výhřevnost (kapalná fáze)	MJ/kg	46,34	47,70	44–46
Teplota vznícení	$^{\circ}\text{C}$	470	372	247–280
Wobbeho index	MJ/m^3	19,295	22,130	-
Oktanové číslo	-	112	89	90–95
Stechiometrický poměr	-	15,5 : 1		14,7 : 1

VÝROBA A DISTRIBUCE

Celosvětová bilance podílu zdroje na výrobě LPG je mezi zemním plynem a ropou 6:4, neboli zemní plyn je pro výrobu zkapalněného ropného plynu využíván z 60 %, zatímco ropa z 40 % [20]. LPG lze jako vedlejší produkt vyrobit zchlazením zemního plynu, získat při těžbě surové ropy či vytvořit při rafinaci ropy. Výroba zkapalněného plynu je poměrně jednoduchá a cenově výhodná, stejně tak spotřeba energie, jež je potřeba k produkci tohoto paliva, je v porovnání se spotřebou energie potřebnou pro vytvoření konvenčních pohonných hmot nižší [1].

Zemní plyn obsahuje převážně methan, nese s sebou však také těžké uhlovodíky C_3 a C_4 . Pokud zemní plyn nebyl očištěn od těchto chemických substancí, je označován jako „vlhký“ a pro jeho

komerční používání je nutné jej těchto těžkých uhlovodíků zbavit. Toho je dosaženo za pomoci zchlazení, kdy se od zemního plynu oddělí frakce propanu-butanu – LPG [1].

V závislosti na kvalitě ropy je v surové ropě obsaženo 1–4 % LPG frakce [1]. Při jednotlivých fázích zpracování ropy vzniká velké množství plynů, které jsou následně stlačeny a vedeny do absorpční kolony. V běžné absorpční koloně dochází k oddělení až 90 obj. % všech uhlovodíků, ze kterých je následně přes destilační a znovu absorpční kolonu vytvořena propan-butanová směs [20].

K přepravě LPG po pevnině se využívá železničních cisteren, cisternových návěsů za tahači či přímo autocisteren. Plyny jsou převáženy zkapalněné, obdobně jsou také skladovány [20].

V České republice je běžně LPG dostupné na čerpacích stanicích nabízejících také konvenční pohonné hmoty. S postupujícím časem a zvyšující se cenou ropných paliv dochází ke zvyšování důvěry řidičů v alternativní paliva, jako je právě LPG, rozhodující je také cena této alternativy, která se většinou pohybuje na poloviční hodnotě oproti například ceně benzínu [3].

POŽADAVKY NA KVALITU PALIVA

Za nejdůležitější požadavek pro použití LPG jako paliva ve spalovacím motoru je jeho čistota. Jde především o odstranění takových látek, které se vyskytují nejčastěji jako přísady po destilaci ropy v kapalném stavu ropných plynů. Důležité je kvalitní odsíření [8]. Rozhodující je také tlak par, tzn. musí být vždy zajištěn dostatečný přetlak. Ten je ovlivněn tlakem a teplotou LPG v nádrži. Kvalita paliva LPG je tedy ovlivněna venkovní teplotou, kdy v zimě je potřeba kontrolovat kvalitu více než kupříkladu v létě [20]. Důležité je také zmínění velké korozní činnosti LPG vůči mědi. Zkapalněný plyn skladovaný v nádržích může rozpojit chemické vazby, což může mít za následek korozi měděných součástí – tato vlastnost je způsobena výskytem vody ve směsi, která při dlouhodobějším skladování klesá ke dnu (LPG má nižší hustotu než voda). Ropný plyn se vyznačuje velice nízkým obsahem vody, jež v něm může být rozpuštěna, nicméně během výroby za vyšších teplot a následné přepravě za teplot nižších může dojít k separaci vody ve směsi. Většinou se poté nachází na dně nádrží malé množství vody. To může mít za následek tvorbu ledu za chladných venkovních podmínek a tím ucpaní sacích ústrojí motoru. Tento problém lze řešit přidáním methanolu do nádrže vozidel, jež se váže na vodu a snižuje její bod tuhnutí, nicméně se špatně mísí s palivem. Existují aditiva užívaná v Evropské unii, jež zlepšují rozpustnost vody v LPG, tzv. tenzidy (angl. surfactants) [1].

4.1.2 ZEMNÍ PLYN

Zemní plyn (angl. natural gas – NG) je směsí plyných uhlovodíků s měnící se příměsí plynů neuhlovodíkových. Z hlediska druhů těchto plynů je převládajícím methan (CH_4), s asi 90–95 obj. %, dalšími mohou být až 4 obj. % dusíku, 4 obj. % ethanu a 1–2 obj. % propanu [2]. Zemní plyn je již dlouho využíván jako palivo plynových turbín v elektrárnách, samotné využití ve vozidlech se datuje od padesátých let minulého století. V České republice je stlačený zemní plyn nejvíce využíván v hromadné autobusové dopravě.

Samotný zemní plyn je používán jako CNG (compressed natural gas = stlačený zemní plyn) v plyném stavu a LNG (liquefied natural gas = zkapalněný zemní plyn) v kapalném skupenství, pro jehož dosažení je třeba teploty $-162\text{ }^\circ\text{C}$.

FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÉ VLASTNOSTI

Zemní plyn je hořlavý, výbušný a dosti těkavý plyn, jenž je popisován jako látka bez zápachu a bez chuti. Obdobně jako LPG je netoxický a nejedovatý, na rozdíl od něj je však lehčí než vzduch. Zkapalněný zemní plyn je poté definován jako namodralá průzračná kapalina bez zápachu, netoxická a s nízkou viskozitou [8]. Veličinami, jež určují vlastnosti zemního plynu, jsou jeho hustota, bod varu, výhřevnost, Wobbeho index, methanové číslo, bod tuhnutí a další, jak je uvedeno v tab. 4.

Tab. 4: Fyzikální a chemické vlastnosti zemního plynu [20], [21]

	Jednotka	CNG	Benzin
Hustota (15 °C, 101,3 kPa)	kg/m ³	0,694	700–800
Bod varu (101,3 kPa)	°C	-162	35–140
Bod tání (101,3 kPa)	°C	pod -182	pod -40
Výhřevnost (plynná fáze)	MJ/m ³	34,1	44–46
Teplota vznícení	°C	537–580	55–95
Wobbeho index	MJ/m ³	53,6	-
Methanové číslo (min.)	-	65	-
Oktanové číslo	-	120	90–95
Stechiometrický poměr	-	17,2 : 1	14,7 : 1

Wobbeho index (Wobbeho číslo) se používá na znázornění výhřevnosti zemního plynu putujícího plynovým potrubím k otvoru s hořákem [22]. Matematicky je vyjádřen jako podíl veličiny HHV (angl. higher heating value), jež je definována jako množství tepla uvolněného objemem paliva poté, co je spáleno a produkty tohoto procesu se navrátí k původní teplotě 25 °C, a odmocnině relativní hustoty vztažené k molární hmotnosti vzduchu [23]. Jednotkou Wobbeho indexu je joule na metr krychlový (často používaná je odvozená jednotka megajoule na metr krychlový).

Methanové číslo vyjadřuje hodnotu odporu zemního plynu vůči vznícení, když je spalováno jako motorové palivo ve spalovacím motoru. Čistý methan má přiřazeno methanové číslo s hodnotou 100, naopak u čistého vodíku je hodnota methanového čísla rovna 0. Methanové číslo směsi rovno 80 bude tedy ekvivalentní směsi s 80 obj. % methanu a 20 obj. % vodíku. V porovnání s oktanovým číslem benzínu lze říci, že se jedná o jeho ekvivalentní vyjádření pro plyny. Neexistuje však žádná univerzální testovací metoda pro zemní plyn a také žádný schválený standardní způsob výpočtu založeného na chemickém složení zemního plynu [21].

VÝROBA A DISTRIBUCE

Zemní plyn je těžen z ložisek jak na pevnině, tak zpod mořského dna. Vytěžený plyn je dále upravován a čištěn tak, aby jej bylo možno používat při běžných aplikacích. Z hlediska výrobních postupů zpracování ropy nebo LPG je oproti nim získání zemního plynu velice jednoduché a bez složitostí.

Doprava je zajišťována potrubím, kupříkladu Evropa je protkána hustou sítí dálkových plynovodů. Potrubí mohou být také vedena po mořském dně, například pro vedení vytěženého plynu ze Severního moře či Afriky [20]. Pro přepravu na velké vzdálenosti je vhodné využití tankerů se zemním plynem v kapalném stavu, neboť oproti skupenství plynném má zemní plyn daleko menší objem (téměř 600krát menší [8]).

Existuje větší množství typů plnicích stanic se zemním plynem – základním typem je stanice distribuující CNG. Těchto stanic není v České republice mnoho, čelí proto velmi vysoké konkurenci daleko rozsáhlejší infrastruktury plnicích stanic s konvenčními palivy. Stanice jsou napojeny na plynovou přípojku, která zajišťuje stálý přísun zemního plynu, toto řešení je však dosti ekonomicky náročné a často i nevýhodné. Další možností je LNG stanice, kdy tyto stanice jsou velmi příbuzné stanicím LPG, zde je však nutné využívat přepravu zkapalněného zemního plynu v kryogenních nádržích kvůli nutnosti nízkých teplot, jež jsou vyžadovány pro udržení zemního plynu v kapalném skupenství. K chlazení těchto nádrží se využívá kapalný dusík [8]. Mixem těchto dvou stanic jsou tzv. LCNG stanice, které pro dopravu zemního paliva využívají cisteren s LNG, následně za pomoci stlačení na požadovaný tlak a odpařovače dojde ke zplynění paliva na výsledný CNG, jenž se následně uchovává v tlakových zásobnících stanice. Výhodou této a LNG stanice je nezávislost na vybudování plynové přípojky, jako je tomu u CNG stanic [20].

POŽADAVKY NA KVALITU PALIVA

Požadavky zemního plynu určuje česká norma z roku 2006 ČSN EN ISO 13443. Tato norma specifikuje například podíl methanu v celkovém objemu zemního plynu na minimálně 85 %, maximálně 7 % ethanu a 4 % propanu. V souvislosti siriých sloučenin je maximální množství obsažené síry stanovené na 30 mg/m³. Samotný zemní plyn také musí být zbaven mechanických a kapalných nečistot [24].

4.1.3 BIOETHANOL

Ethanol je palivo na bázi alkoholu a je označováno jako jedno z nejdůležitějších biopaliv současnosti. Zároveň je to však jedno z nejstarších alternativních paliv, na trhu se objevil v podstatě současně s benzinem, byl totiž používaným palivem v prvních automobilních vozidlech amerického konstruktéra Henryho Forda [8]. Dnes je jako palivo ve spalovacích motorech nejrozšířenější v Brazílii, kde již první pokusy použití bioethanolu v dopravě byly uskutečněny v roce 1933 – důvodem je masivní export třtinového cukru, jenž například v roce 2020 činil 32,15 milionů tun [25].

V této podkapitole bude pojednáno o bioetanolu, jenž předponou bio odkazuje na původ z obnovitelných zdrojů (biomasy), a také o bio-ETBE – bio-etyl-terc-butylether, což je kapalná směs paliva vyrobená na bázi bioethanolu.

FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÉ VLASTNOSTI

Alkoholy nižších skupin mají podobné vlastnosti jako paliva ropná. Jejich výhřevnost je sice nižší, díky jejich vysokému oktanovému číslu je však možné zvýšení kompresního poměru zážehového motoru. Mají velkou schopnost vázat vodu – to sice pomáhá výrazně dokonalejšímu spalování, kdy při tvorbě směsi dochází k vnitřnímu spalování, na druhou stranu je jejich použití spojeno se vznikem koroze a degradace paliva [8]. Cetanové číslo ethanolu je nízké, což z něj nedělá příliš vhodného kandidáta pro použití ve vznětových motorech, je nutná úprava motoru [2]. Je vhodné také zmínit tlak par dle Reida, což je veličina vycházející ze zkoušky dle Reida, jež určuje ideální tlak par paliva v uzavřené nádobě při 38,5 °C (100 °F) a vypovídá o míře těkavosti paliva [26]; ethanol má tuto veličinu vůči benzínu poměrně nízkou [20], viz tab. 5.

Tab. 5: Fyzikální a chemické vlastnosti ethanolu [20]

	Jednotka	Ethanol	Benzin
Chemický vzorec	-	C ₂ H ₅ OH	C ₅ –C ₁₂
Hustota (15 °C, 101,3 kPa)	kg/m ³	789	700–800
Bod varu (101,3 kPa)	°C	78	35–140
Bod tání (101,3 kPa)	°C	-114	pod -40
Výhřevnost	MJ/kg	26,4	44–46
Tlak par dle Reida	kPa	16,5	55–95
Teplota vznícení	°C	366	247–280
Oktanové číslo	-	109	90–95
Cetanové číslo	-	11	5–20
Stechiometrický poměr	-	9,02 : 1	14,7 : 1

Oproti ethanolu ETBE disponuje vyšším tlakem par dle Reida pohybujícím se v ideálním rozmezí, vyšším oktanovým číslem a také větší výhřevností, jak je uvedeno v tab. 6.

Tab. 6: Fyzikální a chemické vlastnosti ETBE [20]

	Jednotka	ETBE	Benzin
Chemický vzorec	-	C ₆ H ₁₄ O	C ₅ –C ₁₂
Hustota (15 °C, 101,3 kPa)	kg/m ³	736	700–800
Bod varu (101,3 kPa)	°C	72	35–140
Bod tání (101,3 kPa)	°C	-114	pod -40
Výhřevnost	MJ/kg	36,0	44–46
Tlak par dle Reida	kPa	28,0	55–95
Teplota vznícení	°C	365	247–280
Oktanové číslo	-	118	90–95
Stechiometrický poměr	-	9,02 : 1	5–20

VÝROBA A DISTRIBUCE

Zdroje bioethanolu jsou přírodního charakteru. Základem pro jeho výrobu je cukr, jenž je fermentací přetvářen za pomoci enzymů (kvasinek) na alkohol. Za pět hlavních cukrů lze považovat pět uhlíkové xylózu a arabinózu a šesti uhlíkové galaktózu, glukózu a manózu, z nichž preferovaný typ cukru používaný pro fermentaci je glukóza, obsažená v sacharidech, a je za pomoci kvasinek přetvářena na ethanol. Zdrojem cukru je poté biomasa bohatá na monosacharidy, což je například kukuřice či cukrová řepa, ekvivalentním zdrojem může být také škrob [27].

K výrobě ethanolu lze použít biomasu s hlavním podílem celulózy (a hemicelulózy), jedná se však o komplexnější, a tedy náročnější produkci kvůli pěti uhlíkové stavbě hemicelulózy, která je svázána s celulórou (tato struktura se nazývá lignin). Pro získání finálního produktu, ethanolu, je využíváno hydrolýzy, konkrétně za pomoci koncentrované či zředěné kyseliny sírové, kyseliny dusičné či předúpravou kyselinou s následovnou enzymatickou hydrolýzou [27].

Výroba ETBE vychází z ethanolu, který reaguje s nenasyceným plynným uhlovodíkem izobutenem (C_4H_8) v přítomnosti kyselého katalyzátoru. Zdrojem izobutenu může být například C_4 alkeny, aditiva přidávaná do benzínu, jež vysoce navyšují oktanové číslo [20].

V současnosti je zřejmé, že s velkou jistotou není možné alkoholy úplně nahradit konvenční paliva. Jako palivo se tedy ethanol či ETBE využívají ve směsi s benzinem, který je poté označován jako např. E10 – benzin s obsahem až 10 % biosložky [8]. Vzhledem k cíli snižování emisí v dopravě do roku 2030, ke kterému se ČR jakožto člen Evropské unie zavázala, byla od roku 2024 povinně zavedena biosložka v benzinu v míře 10 % buď s využitím ethanolu, ETBE, či obou složek současně [28].

Při přepravě je důležité myslet na skladování benzínu s ethanolem a jeho dlouhodobější odstávky v nádrži. Ethanol je schopný do sebe pojit vodu, která pak má za následek jak rozdělení směsi benzin a ethanol na dvě fáze, tak vzniku koroze na dně nádrží a ucpání částičky rzi filtrační soustavy motoru [8]. Z tohoto hlediska se jeví jako vhodnější varianta přídavek ETBE, který má daleko menší rozpustnost ve vodě, a tudíž je z hlediska skladování daleko výhodnější. ETBE má také větší snášenlivost s různými druhy pryžovými a plastovými těsněními v motoru než ethanol, který může z umělohmotných materiálů vysávat změkčovadla a tím zamezovat jejich funkčnosti [20].

POŽADAVKY NA KVALITU PALIVA

Kvalitu benzínu s biosložkou, která je ve směsi povinná, určuje česká státní norma ČSN EN 228 +A [28]. V kontextu přínosu pro životní prostředí má přidávání ethanolu či ETBE do benzínu pozitivní efekt, neboť přidávaná složka dokáže snížit tvorbu emisí CO o více než 25 %, tuhých částic téměř o polovinu a emisí NO_x až o čtvrtinu než čistý benzin. Naproti tomu však navíc vznikají emise aldehydů ve výfukových plynech [8].

Použití ethanolu jako samostatného paliva a ne pouze jako přídavku do benzínu lze u speciálně upravených motorů, které však nejsou po Evropě příliš rozšířené a ani se jejich větší rozmach nechystá [20] – za zmínku však stojí speciální původně vznětový motor vyrobený švédskou firmou Scania, jehož palivem je bioethanol s 2 % aditiva, které vylepšuje přirozeně malou vznětlivost ethanolu [29], je zobrazen na obr. 7.



Obr. 7: Těžkotonážní motor poháněný bioethanolem zkonstruovaný firmou Scania [30]

4.1.4 BIOMETHANOL

Methanol, také již zastarale dřevní líh, je alkohol, jenž lze použít podobně jako benzin v zážehových motorech a po přestavbě také motorech vznětových. Obdobně jako u ethanolu, i zde předpona bio odkazuje na zdroj výroby methanolu přírodního původu, tedy biomasu. Methanol byl používán ve větším měřítku využíván hlavně v USA jako směsi paliv M3 (3 obj. % methanolu a 97 obj. % benzínu) a M85 (85 obj. % methanolu a 15 obj. % benzínu) v zážehových přeplňovaných spalovacích motorech, než byl z nedostatku zájmu a tehdejšímu rapidnímu poklesu ceny ropných paliv zavrhnut a nahrazen v současnosti používanějším ethanollem [31].

Z methanolu lze vyrobit také bio-MTBE (bio-methyl-terc-butylether), což je podobně jako ETBE žádané aditivum do automobilových benzinů.

FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÉ VLASTNOSTI

Methanol disponuje obdobnými vlastnostmi jako ethanol, viz kapitola 4.1.3. Oproti němu je však pro člověka a ostatní živé organismy silně jedovatý a toxický, vyvolává otravu, která se projevuje poruchami vědomí, bolestmi břicha, zvracením a ataxií. Možná je také otrava po vdechnutí metanolových výparů [32]. Oproti benzínu umožňuje methanol vyšší účinnost spalování v motoru díky své vysoké energetické hustotě, má nižší teplotu hoření a obecně se s ním manipuluje jednodušeji díky menší prchavosti. Stejně jako ethanol má však sklon díky velké snášenlivosti s vodou ke vzniku koroze a také podobně negativně ovlivňuje umělohmotné materiály v motorech [8]. Důležité fyzikální vlastnosti methanolu jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7: Fyzikální a chemické vlastnosti methanolu [32]

	Jednotka	Methanol	Benzin
Chemický vzorec	-	CH ₃ OH	C ₅ -C ₁₂
Hustota (15 °C, 101,3 kPa)	kg/m ³	791	700–800
Bod varu (101,3 kPa)	°C	64,7	35–140
Bod tání (101,3 kPa)	°C	-97,7	pod -40
Výhřevnost	MJ/kg	19,7	44–46
Tlak par dle Reida	kPa	32	55–95
Teplota vznícení	°C	470	247–280
Oktanové číslo	-	105	90–95
Cetanové číslo	-	5	5–20
Stechiometrický poměr	-	6,49 : 1	14,7 : 1

MTBE vyrobené na bázi methanolu se podobně jako ETBE s ethanollem vyznačuje větší výhřevností, vysokým oktanovým číslem a oproti methanolu se vhodněji mísí s benzínem, což umožňuje dokonalejší spalování a vznik menšího množství emisí [20], viz tab. 8.

Tab. 8: Fyzikální a chemické vlastnosti MTBE [13]

	Jednotka	MTBE	Benzin
Chemický vzorec	-	C ₅ H ₁₂ O	C ₅ –C ₁₂
Hustota (15 °C, 101,3 kPa)	kg/m ³	735,3	700–800
Bod varu (101,3 kPa)	°C	55,1	35–140
Bod tání (101,3 kPa)	°C	-108,6	pod -40
Výhřevnost	MJ/kg	22,9	44–46
Tlak par dle Reida	kPa	55,2	55–95
Teplota vznícení	°C	435	247–280
Oktanové číslo	-	117	90–95
Cetanové číslo	-	6	5–20

VÝROBA A DISTRIBUCE

V 19. století a prvních desetiletích 20. století bylo zdrojem výroby methanolu převážně dřevo a dřevěné zbytky. V tomto procesu výroby vznikal methanol převážně jako vedlejší produkt při výrobě hlavního produktu dřevoplynu [18], viz kapitola 3.2 (odtud odvozený druhotný název methanolu „dřevný líh“). Současná výroba biomethanolu z biomasy vede ke konverzi biomasy za pomoci zplyňování na tzv. syntézní (syntetický) plyn, ze kterého je methanol získán podobně jako ze syntézního plynu původem ze zemního plynu [27].

Před samotným zplynění biomasy musí být směs předpřipravena, aby ji bylo vhodné touto metodou zpracovat, a to snížit její objem stlačením a co nejvíce zbavit vlhkosti. Následně je biomasa zahřívána bez přístupu kyslíku. Po překročení dané teploty se struktura biomasy rozpadne na plyn a pevný zbytek (ve formě popela) [27]. Syntetický plyn vzniklý touto metodou musí mít vhodné složení, aby se z něj dal vyrobit methanol, ideální je přítomnost oxidů uhlíku s vodíkem. Následně je plyn syntézou přeměněn za pomoci redukováné katalytické reakce na bázi NiO, CuO nebo ZnO na surový methanol. Následnou několika úrovní destilací je z něj poté odstraněna přebytečná vlhkost a další prvky [33].

Výroba MTBE z methanolu je metodou i principem podobná výrobě ETBE z ethanolu, viz kapitola 4.1.3). V porovnání s ethanolom je reakce methanolu s izobutenem výnosnější, lze tedy získat více MTBE oproti ETBE při stejném množství methanolu a ethanolu. V současnosti je methanol v sektoru výroby paliv používán výhradně pro výrobu MTBE, jako palivo či směs s benzinem je po světě využíván málo [20].

Za zmínku stojí metoda MTG (methanol-to-gasoline), neboli výroba benzínu z methanolu. Metoda byla objevena na konci sedmdesátých let minulého století [34] a vypadala velmi slibně, nicméně záhy se objevilo, že celkový proces probíhá s energetickou ztrátou, a od metody bylo upuštěno [8]. V současnosti se však k této metodě znovu obrací pozornost a vyvíjí se nové metody, které již nepůsobí s energetickou ztrátou, více v kapitole 5.3.

POŽADAVKY NA KVALITU PALIVA

Vzhledem k podobnosti methanolu a ethanolu lze hovořit o stejných požadavcích na kvalitu paliv pro spalovací, konkrétně zážehové motory. Methanol z výroby obsahuje menší množství vody než ethanol, stejně tak dusíkatých sloučenin. Na druhou stranu jsou methanol a MTBE

podstatně více rozpustné ve vodě než ethanol a ETBE a pomaleji se rozkládají v přírodě [20]. Vzhledem k toxicitě methanolu, a tedy i MTBE, je důležitá opatrná manipulace s těmito palivy.

4.1.5 BIOPLYN (BIOMETAN)

Bioplyn byl a stále je tradičně využíván pro vytápění, přípravu jídel, osvětlení apod., v poslední době v kontextu odklonu od konvenčních paliv z ropy je však v hledáčku paliv dopravních prostředků. Možná různorodost použití bioplynu i jeho následných zpracování je v porovnání s konvenčními druhy paliv mnohem jednodušší a také z hlediska emisí a uhlíkové stopy v celkovém součtu mnohem efektivnější [35]. Nejvíce je bioplyn jako palivo spalovacích motorů využíván ve Švédsku, kde je vyráběn především z odpadu potravinářského průmyslu či z bioodpadu; ze statistik z roku 2018 vyplývalo, že devět z desíti dvoustopých vozidel poháněných plynem spalovalo právě biomethan [36].

FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÉ VLASTNOSTI

Bioplyn je směsicí plynů, z nichž hlavním je methan (CH_4), který se podílí na spalování a je hlavním činitelem podávání výkonu v motoru. Ostatními plyny a prvky ve směsi, které se v podstatě řadí mezi nečistoty (vyjma vodíku), jsou poté oxid uhličitý (CO_2), dusík (N_2), vodík (H_2), sirovodík (H_2S), čpavek (NH_3) a další [35], viz tab. 9. Objemové procentuální zastoupení v bioplynu se pak liší na základě původu vzniku plynu, z hlediska nejvyššího potenciálu jsou v této práci zastoupeny dvě možnosti získání bioplynu, a to pomocí anaerobní fermentací / digesce biomasy umělé a přirozené (tzv. skládkový plyn) [27].

Tab. 9: Složení bioplynu [35]

Části směsi	Chemický vzorec	Koncentrace (obj. %)	Konc. ve sklád. plynu (obj. %)
Methan	CH_4	53–70	35–65
Oxid uhličitý	CO_2	30–47	15–50
Dusík	N_2	0–3	5–40
Vodík	H_2	0–2	0–5
Sirovodík	H_2S	0–10	0–100
Kyslík	O_2	0–1	0–5
Vlhkost (voda)	H_2O	5–10	0–5
Čpavek	NH_3	0–100	0–5
Oxid uhelnatý	CO	–	0–3

Vlastnosti bioplynu uvedeny v tab. 10 naznačují, že v porovnání s konvenčními palivy disponuje bioplyn poměrně nízkou výhřevností, což je způsobeno vysokým obsahem oxidu uhličitého ve směsi [35]. Na druhou stranu, jsou-li splněny požadavky na čistotu bioplynu, lze uvažovat o kvalitě bioplynu stejné, jako je zemní plyn splňující české státní normy.

Tab. 10: Fyzikální a chemické vlastnosti bioplynu¹⁾ [20], [35], [37]

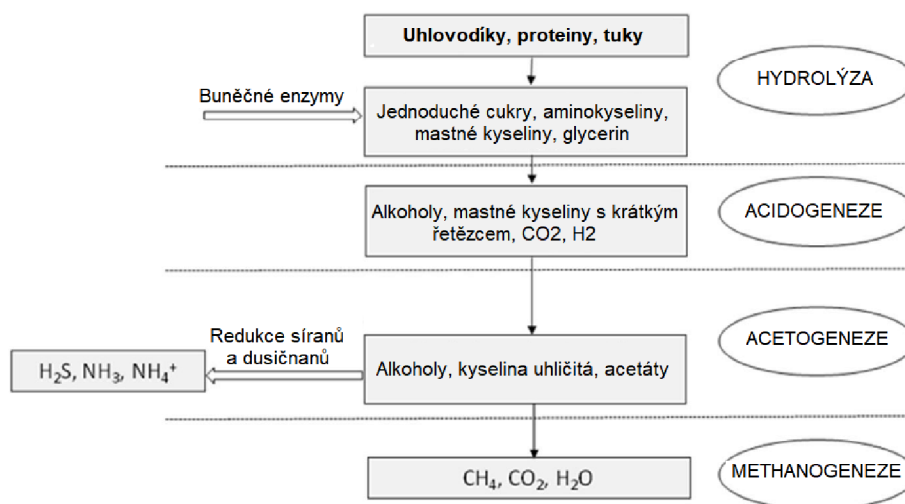
	Jednotka	Bioplyn	Benzin
Hustota (15 °C, 101,3 kPa)	kg/m ³	1,2	700–800
Bod varu (101,3 kPa)	°C	-162	35–140
Bod tání (101,3 kPa)	°C	<-182	pod -40
Výhřevnost	MJ/kg	17	44–46
Teplota vznícení	°C	650	247–280
Oktanové číslo	-	130	90–95
Wobbeho index	MJ/m ³	~44–47 ²⁾	5–20
Stechiometrický poměr	-	3–9 : 1	14,7 : 1

¹⁾ Při složení bioplynu: 60 obj. % CH₄; 30 obj. % CO₂; 0,18 obj. % CO; 0,18 obj. % H₂ ad.

²⁾ Požadavek švédské technické normy SS 15 54 38

VÝROBA A DISTRIBUCE

Bioplyn vzniká z biomasy za přítomnosti anaerobních mikroorganismů během digesce. Proces fermentace methanu lze rozdělit do několika fází – hydrolýzy, acidogeneze, acetogeneze a methanogeneze, jak je zobrazeno na obr. 8, přičemž jsou tyto fáze prováděny různými druhy různě provázaných mikroorganismů – vyprodukované látky bakteriemi na konci jedné fáze slouží jako potrava bakterií na začátku fáze další. Z tohoto vyplývá, že methan je bakteriálním metabolickým odpadem na konci poslední fermentační fáze [1].



Obr. 8: Zjednodušený diagram fermentace biomethanu [1]

Nejčastěji je k produkci bioplynu využívána tzv. vlhká digesce, což je technologie, ve které má směs biomasy pouze 12–15 % suché složky, díky tomu je možné ji čerpat čerpadly a tím zefektivnit proces. Samotná produkce probíhá v tzv. bioreaktorech (fermentorech) [1].

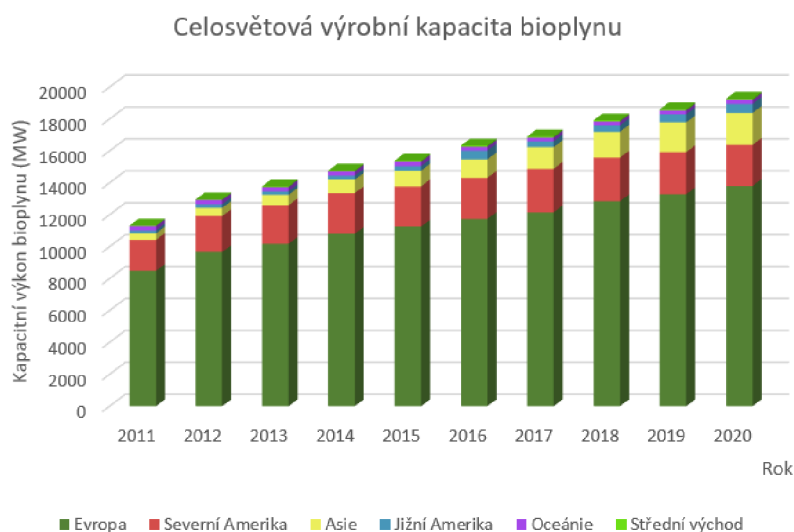
Skládkový plyn (angl. landfill gas) je produkován mikrobiálním rozpadem odpadu bez přístupu kyslíku. Samotný odpad nemusí být přitom původem od člověka, skládkový plyn může také vznikat přirozeným rozpadem odumírajících rostlin a tlejících těl uhynulých zvířat, např. bažina, mokřady či rašeliniště. Čerpán je za pomoci systému čerpadel či dmychadel do míst, kde

může být dále upravován či rovnou využíván pro generování elektřiny či nahrazení fosilních paliv (kupříkladu zemního plynu) v průmyslu [27].

POŽADAVKY NA KVALITU PALIVA

Bioplyn musí být pro použití jako palivo ve spalovacích motorech vyčištěn od nečistot, což jsou ve své podstatě všechny vyskytující se látky ve směsi kromě methanu, udávané v tab. 7. Za hlavní způsoby čištění jsou považovány technologie zahrnující fyzikální a chemickou absorpci, adsorpci, membránovou destilaci, zchlazování a nově také biologické metody [38]. Všechny tyto metody jsou použitelné pro odstranění většiny nečistot až na CO₂, jehož odstraňování je v současné době ve své rané fázi vývoje, procesy zbavujících bioplyn CO₂ se souhrnně nazývají upgradování bioplynu (angl. biogas upgradation) [35]. Nejrozšířenější metodou upgradování bioplynu je čištění vodou (angl. water scrubbing), které umožňuje získání plynu s čistotou více než 97 obj. % methanu a méně jak 2 obj. % CO₂. Metoda spočívá ve stlačení bioplynu na 6–20 barů (600–2 000 kPa) následovaného zchlazením na 20 °C, poté je promícháván s proudem vody v absorpční koloně. Oxid uhličitý, zachycený ve vodě, se po očištění bioplynu uvolní do atmosféry [38].

Bioplyn je slibným řešením v otázkách paliv spalovacích vozidel, nicméně jeho dostupnost je závislá na zeměpisné lokaci a dostupnosti vhodné půdy a prostředí. Vzhledem k produkci bioplynu je vhodné ještě zmínění výrobní kapacity, která znázorňuje stoupající trend získávání a využívání bioplynu hlavně v Evropě, ale také v ostatních částech světa, jak lze pozorovat na obr. 9.



Obr. 9: Znárodnění celosvětové produkce bioplynu v MW [35]

4.2 ALTERNATIVNÍ PALIVA PRO VZNĚTOVÉ MOTORY

Vznětové motory využívají ke svému provozu převážně těžká tekutá paliva (viskóznější a s vyšší hustotou než lehká paliva, např. benzin), lze je však po konstrukčních úpravách provozovat s lehkými a plynnými palivy, která byla zmíněna v kapitole 4.1 (např. CNG, LPG).

4.2.1 BIONAFTA

V sedmdesátých letech minulého století vznikla idea využít rostlinný olej či živočišný tuk namísto nafty ve vznětových motorech, brzy však bylo zjištěno, že samotný olej nelze použít bez

nutné větší přestavby motoru – bylo tedy nutno přepracovat rostlinný olej na methylestery [8]. Tomuto procesu přeměny olejů a tuků se říká transesterifikace (také reesterifikace), která snižuje hodnotu kinematické viskozity rostlinných olejů a živočišných tuků a přibližuje ji k hodnotám kinematické viskozity nafty z ropy [39], tato metoda bude podrobněji popsána níže.

Bionafta se značí přídomkem B, značení B100 odpovídá čisté (100%) bionaftě [2]. Bionaftu lze rozdělit na bionaftu 1. generace a 2. generace, přičemž 1. generace značí právě čistou, sto procentní bionaftu B100, zatímco k 2. generaci se řadí směs bionafty a konvenční nafty v určitém poměru; bionafta je totiž výborně mísitelná s naftou [8]. Bionafta je v anglicky mluvících zemích známá pod zkratkou FAME (fatty acid methyl ester), v České republice je díky výrobě z řepkového oleje známa pod zkratkou MEŘO (methylester řepkového oleje).

FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÉ VLASTNOSTI

Bionafta neobsahuje žádné aromatické uhlovodíky (areny) ani síru a vykazuje vysoké cetanové číslo. Konkrétní fyzikální a chemické vlastnosti bionafty jsou určeny použitým alkoholem při transesterifikaci, díky své nízké ceně je ve vysoké míře využíván methanol [9]. Klíčovou vlastností paliva do vznětových motorů je cetanové číslo, jehož vyšší hodnota je u konvenční nafty spojena s redukcí NO_x emisí; u bionafty, která může mít vzhledem k naftě cetanové číslo vyšší, byl však i přesto pozorován zvýšený výskyt těchto emisí [40]. Další důležitou vlastností je viskozita, která ovlivňuje atomizaci paliva ve spalovací komoře; tato vlastnost je přímo závislá na tzv. stupni nenasycenosti, jenž je určen způsobem výroby paliva [41]. Další vlastnosti jsou uvedeny v tab. 11.

Tab. 11: Fyzikální a chemické vlastnosti bionafty¹⁾ [1], [2], [9]

	Jednotka	Bionafta	Nafta
Hustota (15 °C, 101,3 kPa)	kg/m ³	880	830–950
Bod varu (101,3 kPa)	°C	182–337	240–360
CFPP	°C	-15–16	-20–0
Výhřevnost	MJ/kg	37,7	42–43
Tlak par dle Reida	kPa	<0,6	-
Teplota vznícení	°C	136	210–250
Cloud point	°C	-5–15	-8
Cetanové číslo	-	56	40–55
Oktanové číslo	-	8	20–30
Kinematická viskozita (40 °C, 101,3 kPa)	mm ² /s	3,5–5,2	1,9–4,1

¹⁾ Bionafta vyrobená z řepkového oleje (MEŘO)

Nemálo důležitou vlastností je také tzv. cloud point, kdy nafta po překročení této teploty může krystalizovat (viz kapitola 2.2). Experimenty byla zjištěna nepřímá úměra mezi veličinou cloud point a poměrem nenasycených mastných kyselin vůči nasyceným [41].

VÝROBA A DISTRIBUCE

Bionaftu lze vyrábět z velkého množství rostlinných olejů a tuků, z nichž v Evropě je nejpoužívanější řepkový olej – MEŘO (angl. RME = rapeseed methyl ester), v USA se používá olej ze sóji (angl. SME = soybean methyl ester) či slunečnice (angl. SUME = sunflower methyl

ester). Lze však také využít použité fritovací a jinak již použité oleje (angl. WVO = waste vegetable oil) [27].

Chemický proces výroby bionafty spočívá v transesterifikaci tryacylglycerolů s využitím alkoholu, kterým je nejčastěji methanol [9]. Proces se taktéž nazývá methanolýza; tato reakce využívá kyselin nebo alkalických kovů, nejčastěji hydroxidu sodného či draselného jakožto katalyzátorů. Při reakci vzniká díky přítomnosti volných mastných kyselin v oleji také mýdlo jako vedlejší produkt, které poté částečně zabraňuje oddělení glycerinu a vody od bionafty – přestože klesá účinnost celého procesu, samotná reakce je i tak vysoce výnosná a jednoduchá [27]. Samotná transesterifikace probíhá při teplotách kolem 240 °C a tlacích 10 MPa s vysokým přebytkem methanolu; ze vstupních surovin kupříkladu 100 kg řepkového oleje s 11 kg methanolu lze poté získat přibližně 100 kg methyl esterů a 11 kg glycerinu [1].

V České republice se v současnosti používá palivo B30, kterým se rozumí směs konvenčního dieselu s MEŘO v poměru 7 : 3, tedy směs je tvořena 70 % nafty z ropy a 30 % MEŘO. Skladování se řídí předpisy normy ČSN 65 6500, která určuje skladování tohoto paliva v temném a suchém prostředí při relativně stálé teplotě 15 °C po dobu maximálně dvou měsíců, při delším skladování by totiž mohlo docházet již k degradaci biosložky [8].

POŽADAVKY NA KVALITU PALIVA

Z hlediska kvality bionafty lze hovořit o obsahu methylesterů, kdy větší množství v celkové směsi značí vysokou kvalitu paliva. Z tohoto hlediska nejlépe vychází bionafta vyrobená z řepkového, sójového a slunečnicového oleje, hmotnostní procenta methylesterů přesahují 99 % v celkové směsi [41]. Klíčovou vlastností ovlivňující výkon a chování motoru je již dříve zmíněná hustota, jež se dle evropské normy EN 14214 musí nacházet v rozmezí 860–900 kg/m³, dále kinematickou viskozitu, jejíž příliš vysoká hodnota může způsobovat nedokonalé spalování a vznik uhlíkatých usazenin ve vstřikovacím ústrojí, stanovuje evropská norma v rozmezí 3,5–5,0 mm²/s [41]. Problémem u bionafty může být také znečištění při výrobě, kdy může vznikat síranový popel, který poté zanáší filtrovací zařízení motoru; evropskou normou je maximální obsah tohoto popela v palivu stanoven na 0,02 % [4].

Dle nejnovějších studií lze pro zlepšení procesu spalování, výkonu a většiny ostatních parametrů týkajících se provozu vznětového motoru přidávat do bionafty vodík ve formě plynu – je však potřebná technologie Diesel Dual Fuel (DDF), díky které je možné provozovat vznětový motor s oběma palivy současně [42].

4.3 BIOBUTANOL

Butanol (také butyl alkohol), jenž byl objeven v roce 1862, se v posledních dekádách stává stále slibnějším alternativním palivem v oblasti spalovacích motorů. Biobutanol lze připodobnit bioethanolu, protože stejně jako on může být získáván z biomasy díky fermentaci. Oproti ethanolu však butanol disponuje vyšším množstvím obsažené energie a vhodnějšími fyzikálními a chemickými vlastnostmi pro spalování ve vznětových motorech [7], viz tab. 12.

Butanol jako takový lze využít v obou typech spalovacích motorů, tedy zážehovém i vznětovém, v případě zážehového však primárně u motorů využívajících přímého vstřiku paliva, a také v motorech s HCCI spalováním či motorech rotačních [43].

FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÉ VLASTNOSTI

Ve srovnání vzhledem k výrobě má butanol oproti ethanolu nižší rozpustnost ve vodě, nižší těkavost a korozivnost. Výhodou je také mnohem lepší mísitelnost s konvenčními palivy, ať už s benzinem či naftou [9]. S ohledem na bezpečnost má o něco vyšší teplotu vznícení, ta však může znamenat horší schopnost startování motoru za chladnějších podmínek [43].

Tab. 12: Fyzikální a chemické vlastnosti butanolu [7], [9], [44]

	Jednotka	Hodnota	Benzin	Nafta
Chemický vzorec	-	C ₄ H ₉ OH	C ₅ –C ₁₂	C ₁₀ –C ₂₆
Hustota (15 °C, 101,3 kPa)	kg/m ³	810	700–800	830–950
Bod varu (101,3 kPa)	°C	108,1	35–140	240–360
Bod tání (101,3 kPa)	°C	–89,8	<-40	-20–0 (CFPP)
Výhřevnost	MJ/kg	33	44–46	42–43
Teplota vznícení	°C	385	247–280	210–250
Oktanové číslo	-	94	90–95	20–30
Cetanové číslo	-	25	5–20	40–55
Stechiometrický poměr	-	11,2 : 1	14,7 : 1	-

Ve srovnání s benzinem má butanol rychlejší průběh hoření, čímž je umožněno lepší spalování. Oproti ethanolu spotřebovává více latentního tepla při výparu, čímž snižuje teplotu ve spalovacím prostoru a tím s sebou nese benefity pro sání vzduchu do spalovací komory [43]. Výskyt kyslíku v uhlovodíkovém řetězci napomáhá snížení produkovaných emisí a čistšímu hoření oproti spalování konvenčních paliv [9].

VÝROBA A DISTRIBUCE

Biobutanol je vyráběn stejně jako bioethanol fermentací za pomoci bakterií. Zdrojem může být lignocelulóza, kukuřice, obilí či škrobová voda. Proces výroby pomocí fermentace je znám pod zkratkou ABE – aceton, butanol, ethanol, neboť tyto produkty jsou tímto procesem získávány. V dnešní době se však kvůli nepříliš vysoké efektivitě fermentačního procesu tato technologie nevyplácí, proto byly vyvinuty nové cesty pro získání butanolu, například výroba přímo z ethanolu, surového glycerolu, bionafty či dokonce syntézního plynu [43]. Většina biobutanolu je v současnosti původem syntetická, vyráběn je petrochemickým procesem, jenž zahrnuje oxo syntézu propylenu, kdy se jedná o hydrogenaci aldehydů vzniklých hydroformylací propylenu [43].

POŽADAVKY NA KVALITU PALIVA

Složitost chemických pochodů procesu výroby biobutanolu a nutnost dodržování přísných podmínek v důsledku potřeby odlučovat výsledné produkty, působící jako inhibitory výrobního procesu, jsou příčiny nízkého výskytu průmyslové produkce biobutanolu. Ve světě se jím zabývá pouze malé procento specializovaných společností Butamax Advanced Biofuels, LLC (Wilmington, USA) a GEVO (Englewood, USA).

4.4 VODÍK

Vodík je nejlehčím a nejjednodušším prvkem na Zemi a v celém nám známém vesmíru. V současnosti je nejvíce vodíku využíváno jako přísada v raketovém palivu, je však možné jej použít také jako palivo v běžných spalovacích motorech osobních automobilů. Vzhledem k jeho

naprosto nulovému zatížení prostředí emisemi se jeví jako velice vhodným kandidátem na poli alternativních paliv, jeho drahá výroba však zapříčiňuje současné nízké využití [45].

FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÉ VLASTNOSTI

Vodík je bezbarvý plyn bez zápachu, který při spalování s kyslíkem za vysokých teplot a tlaků produkuje tepelnou energii a vodu. Rychlost plamene při jeho hoření je vysoká, čímž se jeví jako vhodné palivo pro zážehové motory; také jeho spalování je rychlé a při téměř konstantním objemu [7]. Vodík je netoxický, při hoření je jeho plamen průhledný a bez kouře; důležité vlastnosti vodíku jsou uvedeny v tab. 13.

Tab. 13: Fyzikální a chemické vlastnosti vodíku [2]

	Jednotka	Vodík	Benzin
Chemický vzorec	-	H ₂	C ₅ –C ₁₂
Hustota (15 °C, 101,3 kPa)	kg/m ³	0,0898	700–800
Bod varu (101,3 kPa)	°C	-252,88	35–140
Bod tání (101,3 kPa)	°C	-259,13	pod -40
Výhřevnost	MJ/kg	120	44–46
Teplota vznícení	°C	585	247–280
Oktanové číslo	-	130	90–95
Cetanové číslo	-	5–10	5–20
Stechiometrický poměr	-	34 : 1	14,7 : 1

VÝROBA A DISTRIBUCE

Výroba vodíku může být uskutečňována přes obnovitelné i neobnovitelné zdroje. Vzhledem k obnovitelným zdrojům se jedná o elektrolýzu vody s využitím solární a větrné energie, která generuje energii elektrickou, jež dělí molekuly vody na jednotlivé prvky kyslíku a vodíku; dále za pomoci biologických procesů, konkrétně fermentací anebo bio-fotolýzou, v těchto případech se na výrobě vodíků podílí fotosyntetické bakterie rozkládající biomasu za přítomnosti slunečního svítu, a cyanobakterie, jež díky redukčních a oxidačních reakcí umožňují průběhu bio-fotolytického procesu, jehož konečným produktem je mimo jiné také vodík [46].

V dnešní době je však přibližně 95 % veškerého průmyslového vodíku na Zemi vyráběno z neobnovitelných zdrojů – fosilních paliv, z čehož plyne jeho vysoká cena a také vznik nežádoucích emisí při jeho výrobě [7]. Nejpoužívanějším výrobním procesem je tzv. reformování methanu nebo parní reforming [45]. Jedná se o reakci vodní páry a zemního plynu (methanu) při tlacích 3–25 barů a teplotách 700–1000 °C za přítomnosti katalyzátoru. Nevýhodou tohoto procesu je jeho velká spotřeba energie (tepelné) a vznik emisních plynů CO a CO₂. Tato výrobní technologie je použitelná také pro výrobu vodíku ze zdrojů jako např. ethanol, propan či také benzin [7].

Nejekonomičtějším způsobem přepravy plynného vodíku distribuční sítí se jeví obdobný jako u distribuce zemního plynu, tedy s využitím potrubí. Skladování vodíku lze uskutečnit třemi možnými způsoby – v kapalně formě při teplotě –253 °C v kryogenních nádržích, v plynné formě při 20–70 MPa a ve formě kovového hydrátu, např. FeTiH₂, který při zahřátí vylučuje právě vodík. Vzhledem k nutnosti využití daleko větší přepravní nádrže než u předešlých dvou zmiňovaných způsobů přepravy je tento způsob distribuce vodíku nejméně využíván [2].

5 PŘEHLED SOUČASNÝCH SYNTETICKÝCH PALIV

V této práci je pojmem syntetická paliva myšlena plynná a kapalná paliva vznikající procesem hydrogenace (adice vodíku) – přeměny uhlíkatého materiálu do plynného či kapalného skupenství. V tomto kontextu lze hovořit o dvou základních typech syntetických paliv: syntetická surová ropa (angl. synthetic crude oil, syncrude) a paliva vzniklá Fischer–Tropsch syntézou.

Z hlediska zdrojů použitých pro výrobu syntetických paliv pak lze hovořit o CTL (coal to liquids) – kapalná paliva z uhlí, BTL či WTL (biomass / waste to liquids) – kapalná paliva z biomasy či odpadu, PTL nebo PTG (power to liquids / gas) – kapalná nebo plynná paliva vyrobená za pomoci elektřiny a také GTL (gas to liquids) – kapalná paliva z plynů. V kontextu získávání paliv z biomasy je v současné době nejvíce vyzdvihována technologie HTU – hydro thermal upgrading.

5.1 SYNTETICKÝ PLYN

V souvislosti s výrobou alternativních a syntetických paliv ze zemního plynu lze hovořit o tzv. GTL procesu, který zahrnuje uměle vyrobená paliva jako methanol, dimethylether, syntetický diesel a další. Zemní plyn lze použít jako samostatné palivo, alternativní ke konvenčním, viz kapitola 4.1.2. Zde v této kapitole, v kontextu paliv syntetických, je o zemním plynu pojednáno jako zdroji pro výrobu takovýchto paliv, konkrétně pro výrobu syntetického plynu, ze kterého jsou následně syntetická paliva získána.

Syntetický plyn, také syntézní plyn, synplyn, (angl. synthesis gas, syngas) je směs plynů obsahující různé množství oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a vodíku, k jejíž výrobě byl využit kupříkladu proces parního reformování zemního plynu [47]. Namísto zemního plynu je možné využít bioplyn [48]. Tato výrobní technologie využívá k přeměně endotermickou reakci zemního plynu s vodní parou s využitím katalyzátoru. Reakce je prováděna uvnitř tzv. parního reforméru při teplotách v rozmezí 700–900 °C, jejímiž produkty jsou H₂ a syntézní plyn – v současnosti je tento proces využíván převážně k průmyslové výrobě čistého vodíku [47].

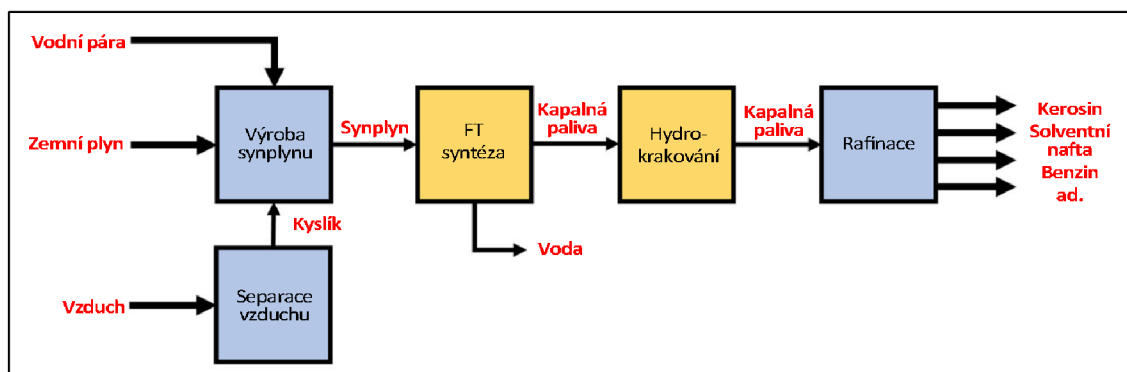
Existuje také alternativní možnost výroby syntetického plynu ze zemního plynu, a to tzv. suché reformování methanu (zemního plynu), které v principu nahrazuje vodní páru v reakci za oxid uhličitý. V porovnání s parním reformováním produkuje suché reformování syntetický plyn s poměrem vodíku a oxidu uhelnatého téměř rovným jedné, tedy mnohem méně než u parního reformování, zároveň je pro proces suchého reformování methanu potřeba vyšší množství dodané energie (tepla). Nicméně pro následnou výrobu syntetických paliv (syntetického benzínu, syntetického dieselu ad.) je syntetický plyn vyrobený suchým reformováním výhodnější z hlediska kupříkladu vznikajících emisí CO₂ při výrobě [49].

Nejběžnější způsob výroby syntézního plynu však v současné době tkví ve zplyňování uhlí. Historicky je obdobný proces znám již výrobou svítiplynu v 19. století, svítiplyn však není vhodný pro použití do spalovacích motorů hlavně kvůli nízkému obsahu methanu. Syntetický plyn vyrobený z uhlí je obsahem bohatý na vodík [50].

Za nejnovější technologii výroby syntetického plynu lze však také považovat jeho výroba z biomasy – jejím zplyněním buď za nižších teplot (<1000 °C) nebo za vyšších teplot (>1200 °C). Proces zplyňováním za nižších teplot probíhá většinou za přítomnosti vzduchu, což má za následek obohacování konečného produktu dusíkem, jenž není žádoucí. Řešením je využití jiné zplyňovací atmosféry (kyslíkem, vodní parou) nebo zplynění za vyšších teplot [23].

Syntetický plyn lze využít jako palivo ve spalovacích motorech buď samostatně, výhradně u zážehových motorů, nebo společně s konvenčním palivem v tzv. duálním režimu, například u vznětových motorů. V porovnání se zemním plynem má významně nižší výhřevnost (4–6 MJ/m³ oproti 34 MJ/m³), při použití v zážehových motorech se však syntetický plyn jeví jako plnohodnotný hráč na poli alternativních paliv. Díky svému vysokému oktanovému číslu má vysokou odolnost vůči detonačnímu spalování, na druhou stranu kvůli velkému obsahu vodíku je dosahováno při stechiometrické směsi vysokých teplot, které zapříčiňují větší vznik nežádoucích emisí NO_x [51].

Výhodnější je však využití syntetického plynu jako základu pro výrobu syntetických paliv s lepšími vlastnostmi ovlivňující spalování ve spalovacích motorech. K tomuto účelu je využíváno například tzv. Fischer–Tropsch (FT) syntézy, pojmenované podle dvou německých chemiků Franze Fischerovi a Hansa Tropschovi, kteří v roce 1925 požádali o patent na jimi popsany proces produkce kapalných uhlovodíků ze směsi plynů [27]. Proces, znázorněný na obr. 10, spočívá v katalytické hydrogenaci oxidu uhelnatého pro získání uhlovodíků a okysličených chemických sloučenin různých délek řetězců s oxidem uhličitým a vodou jako vedlejšími produkty. Jako katalyzátory se v dnešní době používají pouze železo a kobalt [52]. FT syntéza syntetického plynu produkuje směs rovných řetězců nasycených uhlovodíků, aromatických uhlovodíků, olefinů ad., z nichž jsou potom rafinací získány produkty jako syntetický diesel, syntetický benzin, solventní nafta ad. Při syntéze mohou také vznikat LPG (propan-butan) a volný methan, obvykle je však cíleno na hodnotnější produkty, a proto je vznik těchto vedlejších produktů minimalizován nebo jsou recyklovány a znovupoužity pro výrobu hlavních produktů [53].



Obr. 10: Diagram procesu GTL [54]

5.2 SYNTETICKÁ ROPA

Syntetická ropa (angl. synthetic crude oil, syncrude) je uměle vyrobená ropa, v současnosti za pomoci technologie nazývané upgradování materiálů, jako jsou živičné písky nebo ropné břidlice [27]. Pro použití ve spalovacích motorech je nutné ji obdobně jako přirozeně se vyskytující konvenční ropu zpracovat rafinací na běžná paliva jako benzin, nafta ad.

Syntetická ropa je směs solventní nafty, destilátů a řady dalších ropných složek. Vyrábí se z živičných písků, což jsou směsi jílu, písku, vody a živic (bitumenů), a ropných břidlic, surovin skládajících se z minerální a organické části a obsahujících kerogen. Z hlediska získávání těchto látek je v současnosti nejvyužívanější těžba, vzhledem k tomu, že ložiska se na světě nacházejí převážně v tajze (Kanada, Rusko), má však tento způsob poměrně závažné dopady na životní prostředí. Zároveň je při těžbě materiálů spotřebované výrazně větší množství vody

v porovnání s těžbou konvenční ropy. Při následné výrobě syntetické ropy je také zapotřebí většího přísunu energie, což zapříčiňuje vznik většího množství CO₂ [55].

V porovnání s běžnou konvenční ropou má syntetická obdobnou hustotu, avšak vyšší viskozitu. Obsahuje také mnohem menší obsah síry, díky čemuž vzniká méně znečištění při jejím spalování. Disponuje však větším obsahem uhlíku, což zapříčiňuje vznik většího množství emisí CO₂ při jejím spalování [56].

Syntetickou ropu lze označit za bioprodukt, pokud je její výroba uskutečňována z biomasy. Výroba takového bioropy (angl. biocrude) spočívá v technologii HTU (angl. hydro thermal upgrading), při níž je biomasa (např. řasy nebo dřevo) společně s vodou po dobu 5–20 minut zpracovávána při teplotách v rozmezí 200–400 °C a tlacích 5–25 MPa [57]. Při tomto procesu je výrazně snížen obsah kyslíku z původních cca 40 % na přibližně 10–15 %, odstraněný kyslík je vyloučen v emisích CO₂, H₂O a CO [58]. Bioropa je tmavá viskózní kapalina nerozpustná ve vodě, ale mísitelná s jinými organickými látkami. Problémem může být její nestabilita, neboť při skladování za vyšších teplot (například již 35 °C) může docházet ke zvyšování její viskozity [57]. Výhřevnost bioropy se pohybuje kolem 30–35 MJ/kg [58]. Fyzikální a chemické vlastnosti bioropy jsou uvedeny v tab. 14 v porovnání s konvenční naftou.

Tab. 14: Fyzikální a chemické vlastnosti a složení bioropy v porovnání s konvenční naftou [57]

	Jednotka	Bioropa ¹⁾	Nafta
Hustota (15 °C, 101,3 kPa)	kg/m ³	970	830–950
Výhřevnost	MJ/kg	34	42–43
Kinematická viskozita (40 °C, 101, kPa)	mm ² /s	196	1,9–4,1
Obsah C	hmot. %	73,7	86,1
Obsah H	hmot. %	8,9	13,8
Obsah O	hmot. %	10,2	0
Obsah S	hmot. %	0,9	<0,005
Obsah N	hmot. %	6,3	0

¹⁾ Bioropa vyrobená z řasové biomasy

Po procesu HTU je ještě nutné bioropu zbavit nečistot a vytvořit z ní kvalitní produkt, jenž poté poslouží jako základ pro výrobu syntetického benzínu, dieselu ad. Nejběžnějším způsobem je tzv. hydrorafinace, která umožňuje odstranění heteroatomů (O, N, S) přidáním H₂ za vysokého tlaku (2–20 MPa) a teplot v rozmezí 250–450 °C za přítomnosti vhodného katalyzátoru. Celková kvalita syntetické ropy a její stabilita je poté vylepšena procesem hydrodeoxygenace [57].

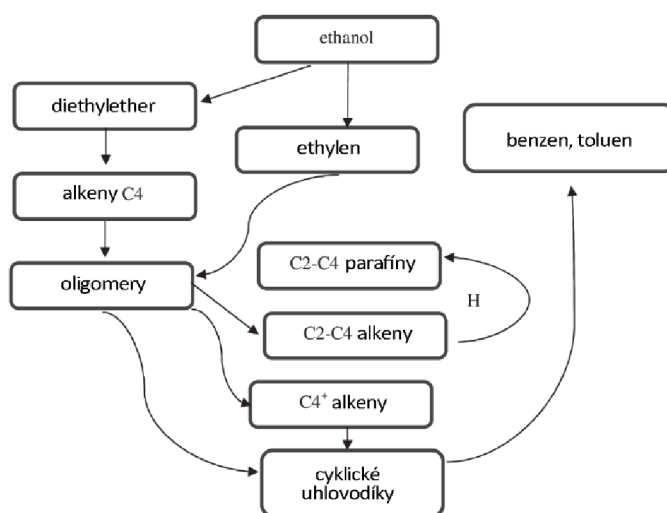
5.3 SYNTETICKÝ BENZIN

Jak již bylo řečeno, technologií GTL lze ze syntetického plynu vyrobit syntetický benzin. V tomto procesu se využívá FT syntézy, při které je vyroben základ pro kapalná paliva, z něhož jsou následně pomocí hydrokrakováním a destilacemi získána právě syntetická paliva jako nafta, benzin, kerosin apod.

Ze syntetického plynu je možné vyrobit také methanol, a to katalýzou při teplotách v rozmezí 200–300 °C a tlacích do 100 barů s katalyzátory oxidu zinečnatého či měďnatého s příměsí hliníku. V současnosti je drtivá většina veškerého vyrobeného methanolu na světě produkována právě tímto způsobem ze syntetického plynu [34]. Ten lze poté využít přímo již jako palivo do

spalovacích motorů, viz kapitola 4.1.4, nebo jej dále zpracovat pomocí procesu MTG (angl. methanol-to-gasoline) – výroba syntetického benzínu z methanolu. Tato katalytická reakce je uskutečněna ve dvou fázích: v první je dehydratací přes hliníkový katalyzátor vytvořena přechodná látka DME (dimethylether), následně je ve druhé fázi taktéž dehydratací, tentokrát však přes zeolitový katalyzátor, vyroben čistý benzin [23].

Obdobně lze synteticky benzin vyrobit také z ethanolu procesem ETG. Tato katalytická transformace se odehrává ve třech krocích, první zahrnuje dehydrataci ethanolu na ethylen, poté probíhá jeho oligomerizace a nakonec následuje tvorba arenů nebo parafinů přes hydrogenaci [59], postup výroby je znázorněn na obr. 11.



Obr. 11: Diagram procesu ETG [59]

Syntetický benzin obsahuje minimální množství síry a nízký obsah benzenu oproti běžnému benzínu z ropy, zároveň pouze 5 % aromatických uhlovodíků a taktéž téměř nulový obsah kyslíku; oproti konvenčnímu benzínu má po svém vyčištění také vyšší oktanové číslo [60]. Vzhledem k téměř naprosto stejným fyzikálním vlastnostem lze konvenční benzin plně nahradit v zážehových motorech za benzin syntetický [23], v tab. 15 je jeho srovnání s ropným benzínem.

Tab. 15: Fyzikální vlastnosti a složení syntetického benzínu ve srovnání s ropným benzínem [61], [62]

	Jednotka	ETG	MTG	Benzin
Hustota (15 °C, 101,3 kPa)	kg/m ³	761,1	752,7	700–800
Teplota vznícení	°C	480	350	247–280
Oktanové číslo	-	91	104	90–95
Tlak par podle Reida	kPa	57	-	55–97
Obsah parafinů	obj. %	41,39	65,59	51,12
Obsah olefinů	obj. %	2,17	0,03	7,19
Obsah alkanů	obj. %	7,4	28,22	3,04
Obsah arenů	obj. %	49,05	3,98	38,65
Obsah benzenu	obj. %	0,3	-	0,5–2,5
Obsah O ₂	hmot. %	0	0	0,05–1,5
Obsah S	hmot. %	0	0	0,05–6

5.4 SYNTETICKÝ DIESEL

Syntetický diesel vyrobený procesem GTL je výhodnou alternativou oproti konvenční naftě díky nízké produkci emisí, jež je zapříčiněna vyšším cetanovým číslem, lepším průběhem hoření a také nulovým obsahem síry. Také výhřevnost může být mírně vyšší, to však záleží například na čistotě původního zemního plynu a z něho posléze vyrobeného plynu syntetického [63]. Hustota syndieselu bývá o 8–9 % nižší než u běžné nafty, je zapříčiněna zvýšeným obsahem parafinu ve směsi. V případě kinematické viskozity je její hodnota u syndieselu nižší, čímž je dosaženo lepšího průběhu atomizace při stříku paliva do spalovací komory, zároveň je tím však snížena schopnost mazání. V porovnání s ropnou naftou se v syntetickém dieselu nachází po výrobě menší množství vody, jež by mohla způsobovat korozi, zároveň je tím kladně ovlivněna termická účinnost spalování a tím i trvanlivost motoru. Z hlediska důležitých teplot paliv vznětových motorů má syndiesel kvůli vysokému obsahu parafinu horší bod ucpání filtru (CFPP) [64]. Podrobněji jsou vlastnosti syntetického dieselu popsány a porovnány s běžnou naftou v tab. 16.

Tab. 16: Fyzikální a chemické vlastnosti syndieselu v porovnání s konvenční naftou [64]

	Jednotka	Syndiesel	Nafta
Hustota (15 °C, 101 kPa)	kg/m ³	760–783	830–950
Cloud point	°C	-5	-8
CFPP	°C	-1	-20–0
Výhřevnost	MJ/kg	43–44	42–43
Teplota vzplanutí	°C	102–105	55–77
Cetanové číslo	-	70–89	40–55
Kinematická viskozita (20 °C, 101 kPa)	mm ² /s	2,34–2,74	1,9–4,1

5.5 DIMETHYLETHER

Výroba dimethyletheru (DME) ze syntetického plynu může být uskutečněna dvěma možnými způsoby, nepřímou a přímou syntézou. Nepřímá syntéza byla popsána při výrobě syntetického benzínu (GTL proces) dříve, kdy nejprve dochází k výrobě methanolu a až následně poté je z něj získán DME. Při přímé syntéze probíhá tvorba methanolu a jeho následná dehydratace na DME v tom samém reaktoru, přičemž při tomto procesu probíhá přeměna většího množství CO než u nepřímé syntézy [9].

DME je vysoce těkavý plyn, jehož je možné zkapalnit při tlacích nad 0,5 MPa a lze s ním tedy nakládat obdobně jako s LPG. V plynném stavu je bezbarvý, netoxický a vysoce hořlavý s lehkými narkotickými účinky. Fyzikální a chemické vlastnosti má podobné již zmiňovanému LPG, jeho cetanové číslo se však pohybuje kolem hodnoty 55, což z něj dělá vhodné palivo do vznětových motorů. Je však možné jeho použití také v zážehových motorech v kombinaci s benzinem a aditivami zvyšujícími oktanové číslo celkové směsi [65]. Vysoký obsah kyslíku zapříčiňuje minimální tvorbu kouře a dýmu při spalování, ale také snižuje výhřevnost paliva. Má nižší hustotu než běžná nafta a špatné mazací schopnosti [7]. Další vlastnosti jsou zmíněny v tab. 17.

Tab. 17: Fyzikální a chemické vlastnosti DME [9]

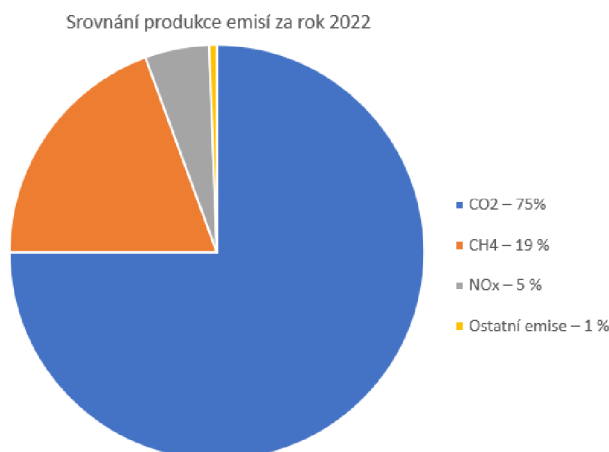
	Jednotka	DME	Nafta
Chemické složení	-	C ₂ H ₆ O	C ₁₀ –C ₂₆
Hustota (20 °C, 101,3 kPa)	kg/m ³	661	830–950
Bod varu (101,3 kPa)	°C	-25	240–360
Cloud point	°C	-	-8
CFPP	°C	-	-20–0
Výhřevnost	MJ/kg	27,6	42–43
Teplota vznícení	°C	235	210–250
Cetanové číslo	-	55–60	40–55
Stechiometrický poměr	-	9 : 1	-
Kinematická viskozita (20 °C, 101,3 kPa)	mm ² /s	<1	1,9–4,1

Poměrně nízká viskozita DME oproti ropné naftě je velkou výzvou pro konstruktéry spalovacích motorů, konkrétně z hlediska těsnění – snadnou prostupností kapalného DME malými otvory. Kvůli nižší výhřevnosti je také nutné zvýšení množství vstřikovaného paliva do válce pro dosažení požadovaného výkonu. DME se dále pyšní vysokým obsahem kyslíku (přibližně 34,8 hmot. %, čímž napomáhá dosažení úplného spalování a tedy zvýšení účinnosti, zároveň také snížení vzniku emisí CO; navíc pozbývá C–C vazeb, čímž je významně snížena tvorba sazí. [65].

6 METODIKA VYHODNOCOVÁNÍ EMISÍ CO₂

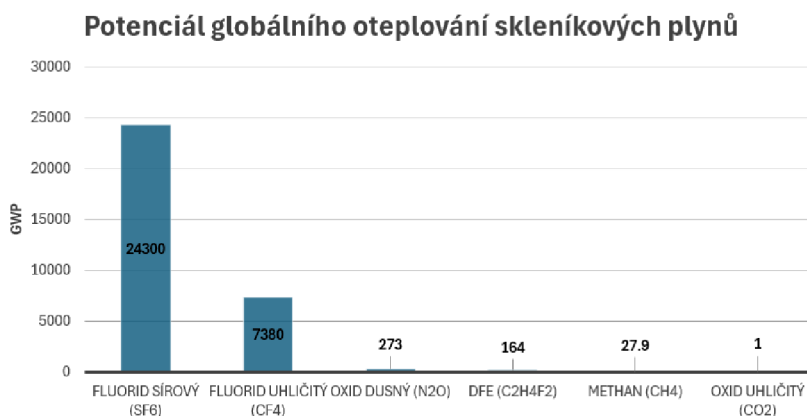
6.1 SKLENÍKOVÉ PLYNY

Skleníkové plyny vyzařují a absorbují energii v širokém spektru záření, a jejich zvýšené množství v zemské atmosféře je tedy velkým rizikem možného oteplování planety a doprovázenou změnou klimatu. Hlavní části těchto plynů jsou oxid uhličitý (CO₂), methan (CH₄), oxidy dusíku (NO_x) a další. Z hlediska produkce těchto plynů lidskou činností je dominantní právě oxid uhličitý, což lze vidět na obr. 12.



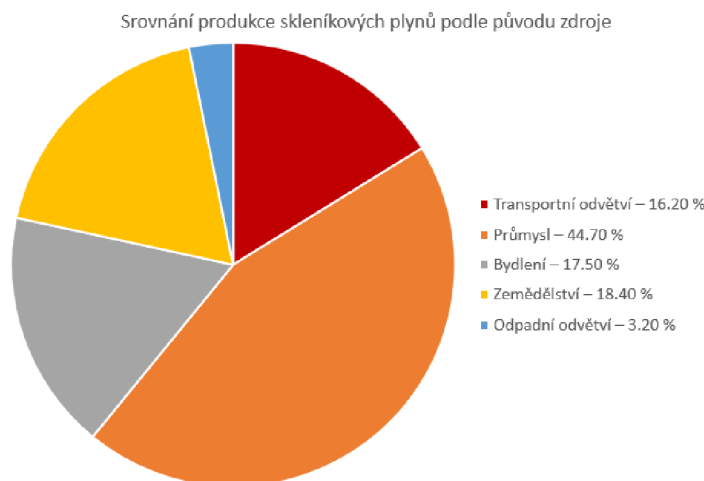
Obr. 12: Porovnání množství skleníkových plynů vyprodukovaných lidskou populací za rok 2022 [66]

V kontextu potenciálně výrazněji negativnějších účinků na pozemské klima je methan mnohem závažnější než CO₂, v kontrastu s tím je však mnohem snáze z atmosféry odbouratelnější, vymizí z ní rychleji (přibližná „životnost“ methanu v atmosféře je 12 let [66]) než oxid uhličitý, jenž může zůstat v atmosféře několik staletí či tisíciletí. Oxidy dusíku (NO_x) jsou ve srovnání s CO₂ také výrazněji účinnější v případě oteplování planety, oproti methanu vydrží delší dobu v atmosféře, přibližně 121 let [66]. Standardní metrikou kvantifikace emisí skleníkových plynů je tzv. ekvivalent CO₂, jenž porovnává významnost v oteplení planety různých plynů a prvků nacházejících se v atmosféře právě vzhledem k oxidu uhličitému. Z tohoto ekvivalentu je vypočítáván tzv. potenciál globálního oteplování – GWP (global warming potential), nejčastěji pro dobu 100 let (GWP₁₀₀), základní hodnota pro plyn CO₂ je 1, srovnání konkrétních plynů je zobrazeno na obr. 13.



Obr. 13: Potenciál globálního oteplování (GWP) vybraných skleníkových plynů [66]

V široké veřejnosti panuje představa, že přesun ze spalovacích motorů na elektricky poháněná silniční vozidla dokáže razantně snížit globální tvorbu emisí [67]. Vzhledem k samotné produkci tohoto skleníkového plynu je však prokazatelné, že produkce CO₂ dopravním sektorem je oproti produkci v průmyslovém sektoru mnohem nižší, než se může zdát, jak dokazuje graf na obr. 14. I s tímto vědomím lze však od počátku 70. let minulého století pozorovat postupně se zvyšující snahu o redukci a snižování různých emisí ze spalovacích motorů za účelem snížení negativních vlivů na životní prostředí. Hodnoty emisí současných spalovacích motorů se dle statistických výpočtů odhadují být o více jak 5 % nižší než ty u motorů vyráběných před 40 lety. Současně je také kladen důraz na požadavky nízkých hodnot emisí již při samotném konstruování motoru.

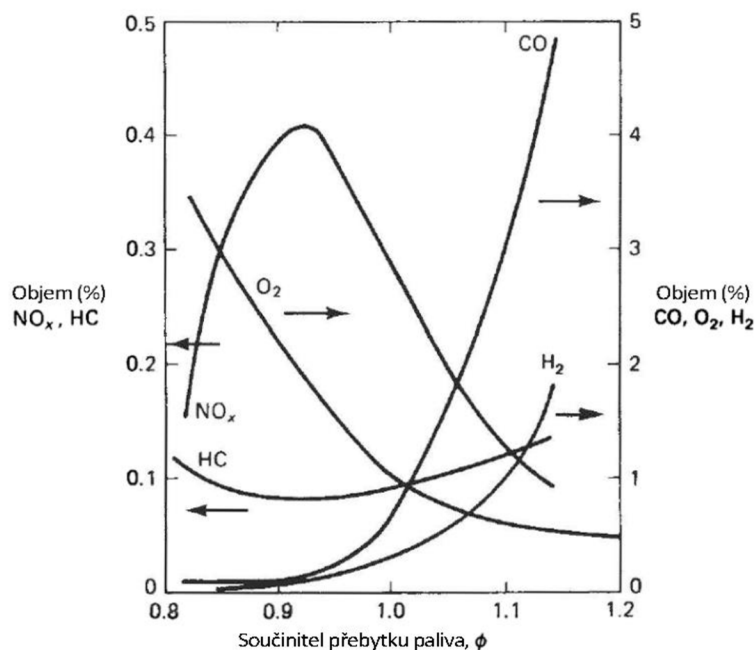


Obr. 14: Porovnání produkce skleníkových plynů dle původu vzniku za rok 2020 [66]

6.2 EMISE SPALOVACÍCH MOTORŮ

Hlavními prvky v emisích spalovacích motorů jsou oxid uhličitý (CO₂), oxidy dusíku (NO_x), oxid uhelnatý (CO), uhlovodíky (HC) a pevné částice [2]. Oxidy dusíku (např. NO, NO₂) vznikají ve spalovacím prostoru během spalování při procesu disociace kyslíku (O₂) a dusíku (N₂). Jejich vznik je významně ovlivňován danou teplotou spalování, kdy při nižších teplotách (např. studený start motoru) jsou tyto emise téměř nulové, a jejich množství se zvyšuje s rostoucí teplotou spalování [2]. Oxid uhelnatý se ve výfukových plynech objevuje z důvodu hoření bohaté směsi, kdy je ve spalovacím prostoru množství kyslíku potřebného pro hoření méně, než by bylo potřeba pro spálení veškerého paliva a jeho přeměny na oxid uhličitý. Rozhodujícím parametrem v kontextu tvorby emisí CO je tedy primárně poměr vzduchu a paliva směsi ve válci. Další možný vznik je způsoben disociací CO₂ při vysokých teplotách hoření [2]. Výskyt uhlovodíků v emisích spalovacích motorů je zapříčiněn přítomností nespáleného paliva, největší množství těchto emisí lze tedy pozorovat při startu motoru a jeho následném zahřívání. Při běžném provozu jsou přibližně 2 % paliva obsaženého ve směsi nespálena a vyloučena v podobě emisí uhlovodíků ve výfukových plynech [2].

Na obr. 15 lze pozorovat závislost množství produkovaných emisí NO_x, CO, HC a ostatních plynů (O₂, H₂) v závislosti na bohatosti směsi u zážehového motoru.



Obr. 15: Emise zážehového motoru v závislosti na bohatosti směsi [4]

6.3 VYHODNOCOVÁNÍ EMISÍ SPALOVACÍCH MOTORŮ

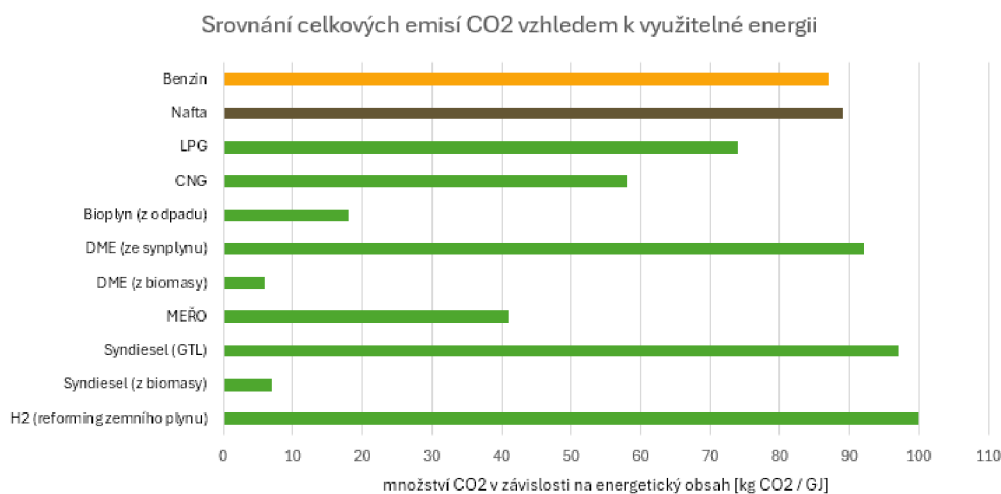
Termín „emise spalovacích motorů“ značí primárně znečišťující prvky ve výfukovém systému motoru. Historicky byly za největší emise považovány saze, částičky pevné hmoty, jež bylo možné spatřit v podobě hustého šedého či černého kouře. Nicméně v současné době produkují spalovací motory mnohem nižší počet pevných částic, stejně tak i jejich velikost se snížila natolik, že většina těchto částic není viditelná pouhým okem [4]. Emise NO_x, CO, CO₂, HC a pevných částic se liší dle typu motoru a jsou závislé na mnoha faktorech, jako například na poměru směsi vzduchu a paliva, časování vstřiku paliva, zatížení, otáčkách, dosahovaných teplot a tlaků ve spalovacím prostoru apod.

Jeden z nejzásadnějších argumentů obhajující využívání alternativních a syntetických paliv ve spalovacích motorech je jejich menší negativní dopad na životní prostředí. Primárním cílem při používání alternativ je snížení tvorby škodlivých výfukových plynů, které způsobují skleníkový efekt a napomáhají nepřírozeně rychlé změně klimatu. Výhodami jsou také např. u plyných paliv v případě jejich úniku téměř žádná zátěž pro půdu a vodní zdroje, u kapalných zase jejich snazší odbouratelnost v porovnání s konvenčními ropnými palivy.

Při posuzování ekologického dopadu na životní prostředí při použití alternativních a syntetických paliv je nutné hodnotit celý životní cyklus zahrnující veškeré fáze těžby surovin, výroby paliva, jeho distribuci ke spotřebitelům a konečně jeho použití ve spalovacích motorech. Jednou z nejpropracovanějších analýz je studie Well-to-Wheels („od zdroje ke kolům“), která se zabývá tvorbou skleníkových plynů u konvenčních motorových paliv jako benzin a nafta, alternativních i syntetických. Samotná analýza je rozdělena na dvě oblasti, první – WTT (well-to-tank), „od zdroje do nádrže“, se zabývá veškerými vzniklými emisemi skleníkových plynů a energetickou náročností při fázích předcházejících využití paliva k přeměně na jiný druh energie, druhá – TTW (tank-to-wheels), „od nádrže ke kolům“, pak posuzuje vznik emisí a energetickou náročnost při spotřebě paliva ve vozidle. Z nejnovější provedené verze této studie poté vyplývají následující body [68]:

1. Všechna alternativní a syntetická paliva (s výjimkou syntetického dieselu vyrobeného syntézou uhlí) se vyznačují lepším výsledkem analýzy WTW – primárně z hlediska tvorby skleníkových plynů – vůči konvenčním ropným palivům, naftě a benzínu.
2. Většina alternativních a syntetických paliv v současnosti přináší významné snížení emisí skleníkových plynů, avšak za cenu vyšší energetické náročnosti.
3. Ve srovnání s konvenčním benzinem a naftou má LPG jen o málo lepší výsledky WTW analýzy.
4. Snížení produkce emisí a spotřeba energie při výrobě a použití bionafty a ethanolu (methanolu) je vysoce závislá na způsobu výroby – nejlepší výsledky jsou dosahovány při využití vedlejších produktů vznikajících při výrobě, například pro výrobu elektrické energie.
5. Produkce bioplynu z odpadu (WTL proces) se vyznačuje velice nízkou tvorbou emisí skleníkových plynů.
6. Ve srovnání s GTL a BTL palivy (syntetický diesel, syntetický benzin) je při výrobě DME ze zemního plynu či biomasy spotřebováno mnohem méně energie a vyprodukováno méně skleníkových plynů.
7. Syntetický diesel vyrobený procesem GTL má sice poměrně výhodnější vlastnosti a vyšší jakost než konvenční nafta, produkce CO₂ je však mírně vyšší.

Pro smysluplné porovnání rozdílných typů alternativních a syntetických paliv je vhodné srovnávat celkovou produkci skleníkových plynů (přepočtené na ekvivalent CO₂) vztahenou na jednotku spotřebované energie, např. kg CO₂ / GJ. Na obr. 16 je srovnání vybraných alternativních a syntetických paliv s konvenčními ropnými palivy.



Obr. 16: Celkové emise CO₂ spojené s výrobou a spotřebou jednotlivých alternativních a syntetických paliv v závislosti na využitelné energii [20]

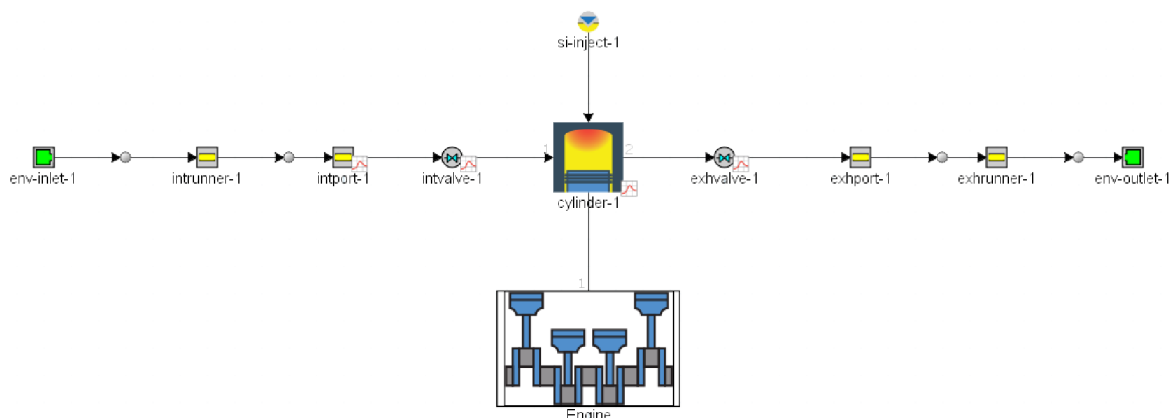
Z analýzy WTW následně vychází také zjištění, že v současnosti je relativně srovnatelná tvorba emisí skleníkových plynů spalovacími motory a motory elektrickými [67]. Hlavním důvodem je poměrně velká závislost na fosilních palivech při výrobě elektřiny, která pro elektrické automobily zapříčiňuje výrazně horší výsledky WTT analýzy oproti běžným konvenčním ropným palivům ve spalovacích motorech. Masivnější používání alternativních a zejména syntetických paliv tedy musí logicky vést k významnějšímu poklesu tvorby emisí skleníkových plynů, než je tomu v případě přechodu na elektrický pohon vozidel.

7 ANALÝZA VLIVU ALTERNATIVNÍCH A SYNTETICKÝCH PALIV NA SPALOVÁNÍ A VÝKON MOTORU

7.1 SIMULAČNÍ MODELY

V této práci je pojednáno o alternativních a syntetických palivech a jejich vlivu na spalování v zážehových a vznětových motorech. Pro účely posouzení průběhu spalování a vnějších charakteristik a porovnání se spalováními běžných konvenčních paliv (benzín a nafta) byly provedeny simulace s využitím softwaru GT-Suite od společnosti Gamma Technologies. Vzhledem k současným příčinám vedoucím k hledání alternativ k ropným palivům, tedy snižování emisí bez výraznějšího snížení efektivity spalovacího cyklu a podávaného výkonu motorů, byla hodnocena paliva dle parametrů jako výstupní výkon motoru (angl. brake power), točivý moment na hřídeli (angl. brake torque), měrná efektivní spotřeba (angl. brake specific fuel consumption) a množství vzniku emisí CO₂. Cílem tedy bylo posouzení vhodnosti použití výše uvedených paliv ve spalovacích motorech a jejich srovnání s palivy konvenčními.

Simulační modely motorů spalujících konvenční ropná paliva byly využity ve své základní podobě příkladů jednoválcového zážehového a vznětového motoru poskytovanými přímo programem GT-Suite, schematicky zobrazeném na obr. 17. Simulace byla provedena pro otáčky v rozptěti 1000–4000 pro oba motory. Základními porovnávacími hodnotami byly simulací vypočítané již výše zmiňované výstupní výkon motoru, měrná efektivní spotřeba, v souvislosti s ní také produkované emise CO₂, a NO_x – pro výpočet emisí oxidů dusíku byl použit rozšířený Zeldovichův model. V případě alternativních a syntetických paliv byly využity stejné modely, následná analýza zahrnovala hledání optimálního poměru maximálního výkonu a nejmenší měrné efektivní spotřeby paliva za pomoci změn vnějších parametrů motoru – součinitel přebytku vzduchu λ , časování sání / vstřiku; a změn vnitřních parametrů motoru – průběh hoření, prodleva vznícení, délka vstřiku a množství vstřikovaného paliva.



Obr. 17: Model 1válcového motoru s přímým vstřikem paliva (Zdroj: vlastní)

Experimentálním motorem v simulaci je jednoválcový motor s pevně danou výchozí geometrií, viz tab. 18. Vzhledem k odlišnostem paliv je pro lepší výsledky v simulacích využito variabilních časování sacích ventilů a vstřikování.

Tab. 18: Geometrie spalovacího prostoru 1válcového motoru

	SI motor	CI motor
Vrtání (mm)	86	100
Zdvih (mm)	86,07	100
Délka ojnice (mm)	175	220
Mezera mezi válcem a HÚ (mm)	1	0,5
Kompresní poměr	10,5:1	16,5:1

Spalování paliva v daném motoru se vždy odvíjí od daného typu spalování a použitého druhu paliva. Za základní typy spalování se dají považovat se zapalováním pomocí jiskry (SI = spark ignition) a pomocí komprese (CI = compression ignition). Hlavní rozdíl tedy leží v typu provedeního zapalování, ne přímo v daném cyklu motoru (Ottův či Dieselův). SI motory běžně využívají předem smíchanou směs paliva a vzduchu, kterou poté zapalují (angl. pre-mixed flame), naopak CI motory nejdříve stlačí vzduch bez paliva na požadovaný tlak a až poté dojde ke vstřiku paliva a jeho vznícení (angl. diffusion flame) [4].

Pro spálení paliva ve válci motoru je nutná také přítomnost vzduchu, respektive kyslíku, který společně s palivem tvoří ve válci směs. Vlastnosti této směsi poté významně ovlivňují proces hoření. Důležitým parametrem u zážehových motorů je tzv. předstih zážehu, tedy zapálení směsi přeskokem jiskry před dosažením horní úvratě. Časování předstihu není konstantní, je závislé na zátěži motoru, tedy otáčkách klikového hřídele, typu paliva (jeho fyzikálně chemických vlastnostech), množství vzduchu ve směsi (bohatosti směsi), kompresním poměru a počáteční teplotě směsi a motoru [3].

Pro dosažení teoreticky dokonalého spálení paliva je nutná tzv. stechiometrická směs, tedy směs, ve které je přesné množství vzduchu (kyslíku) pro dokonalé spálení paliva. Při přebytku paliva ve směsi se jedná o směs bohatou, při přebytku vzduchu o směs chudou. Množství vzduchu a paliva ve směsi přímo ovlivňuje podávaný výkon motoru a také tvorbu emisí. Vzhledem k odlišnosti ideálního a reálného průběhu spalování byl zaveden tzv. součinitel přebytku vzduchu λ , jenž udává poměr skutečné hmotnosti vzduchu vůči teoretické (ideální). Pokud $\lambda < 1$, jedná se o směs bohatou, pokud $\lambda = 1$, skutečná hmotnost přivedeného vzduchu je rovna jeho teoretické spotřebě, pokud $\lambda > 1$, jedná se o chudou směs [3].

Následné hoření paliva – časový průběh vývinu tepla při spalování směsi ve válci v závislosti na otočení klikové hřídele – lze popsat analyticky tzv. Wiebeho křivkou (Wiebeho zákonem hoření), jež je dána rovnicí (1) [69] a zobrazena na obr. 18

$$x_H(\alpha) = 1 - e^{-C\left(\frac{\alpha}{\alpha_d}\right)^{m+1}}, \quad (1)$$

kde x_H je podíl spáleného paliva, α je dané pootočení klikového hřídele, α_d je úhel natočení klikového hřídele, při němž probíhá spálení veškerého paliva, m je charakteristický parametr hoření, C je parametr Wiebeho funkce určující účinnost spalování, jenž lze vypočítat dle rovnice (2) [70]

$$C = -\ln(1 - \eta_{ch}), \quad (2)$$

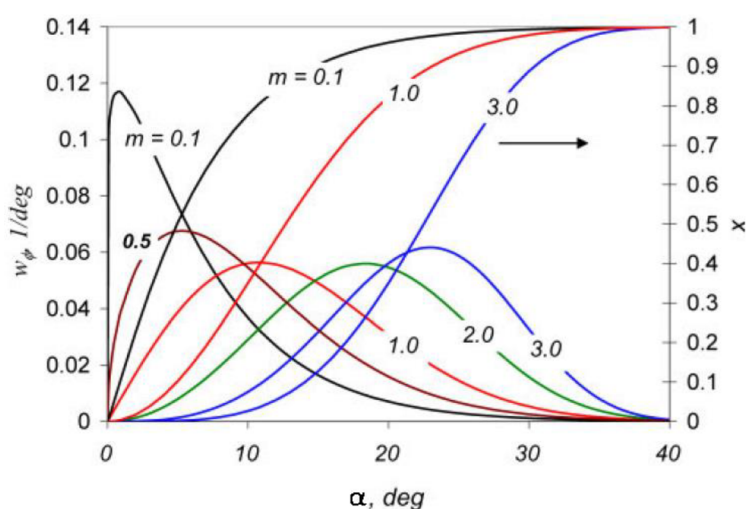
kde η_{ch} je chemická účinnost spalování; za předpokladu spálení 99,9 % veškerého paliva je řešení rovnice

$$C = -\ln(1 - 0,999),$$

$$C = 6,908.$$

Často se také využívá derivace Wiebeho křivky pro zobrazení vývinu tepla během hoření a jeho intenzity, z toho plyne rovnice

$$\frac{dx_H}{d\alpha} = C \cdot (m + 1) \cdot \left(\frac{\alpha}{\alpha_d}\right)^m \cdot e^{-C \cdot \left(\frac{\alpha}{\alpha_d}\right)^{m+1}} \quad (3)$$



Obr. 18: Ukázka Wiebeho křivky a její derivace při $\alpha_d = 40^\circ$ s různými hodnotami koeficientu m [69]

Pro stanovení správného tvaru Wiebeho křivky je potřebné znát a definovat čas potřebný pro spalování a u zážehových motorů také moment zážehu. Koeficient m , jenž určuje tvar křivky a je závislý primárně na druhu paliva, se běžně stanovuje experimentálně, v tab. 19 jsou uvedeny příklady hodnot pro různá paliva.

Tab. 19: Experimentálně získané hodnoty koeficientu m Wiebeho křivky [71]

Palivo	Koeficient m
benzin	2
nafta	0,5
CNG (methan)	2,2
methanol	2

7.2 SPALOVÁNÍ V ZÁŽEHOVÉM MOTORU

7.2.1 SPALOVÁNÍ BENZINU

Pro spalování benzínu činí stechiometrický poměr 14,7 kg vzduchu na 1 kg paliva (objemově přibližně 1,3 litru benzínu). Předstih zážehu se běžně pohybuje kolem 10° před dosažením horní úvratě při nižším zatížení, při vyšším probíhá zážeh dříve, až 40° před dosažením horní úvratě [3]. Samotné vstřikování benzínu je možné uskutečňovat nepřímým vstřikováním do sacího traktu motoru, nebo technologií GDI (angl. gasoline direct injection), tedy přímým

vstřikováním, jež se jeví v současnosti jako nejefektivnější způsob, neboť umožňuje vznik optimální homogenní směsi paliva se vzduchem a má pozitivní vliv na následný vznik emisí. Přímé vstřikování benzínu je řízeno řídicí jednotkou automobilu, které za pomoci sesbíraných dat o aktuálních otáčkách a poloze klikové hřídele, zatížení motoru a teplotách v reálném čase upravuje množství a časování vstřikovaného benzínu do válce.

SIMULACE SPALOVÁNÍ BENZINU

Pro simulaci průběhu spalování benzínu byl využit základní model v programu GT-Suite, pro niž jsou definované vstupní podmínky popsány v tab. 20.

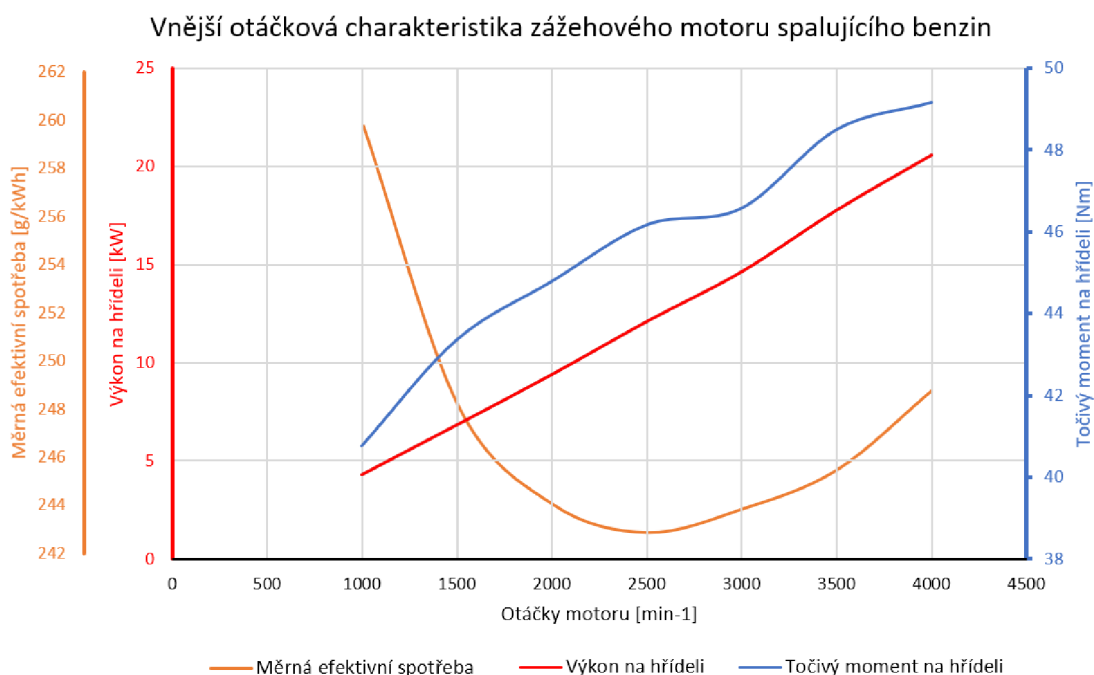
Tab. 20: Vstupní podmínky simulace spalování benzínu

Wiebeho koeficient	2
Anchor angle ¹⁾ (°)	8
Duration ²⁾ (°)	25
Součinitel přebytku vzduchu	0,94

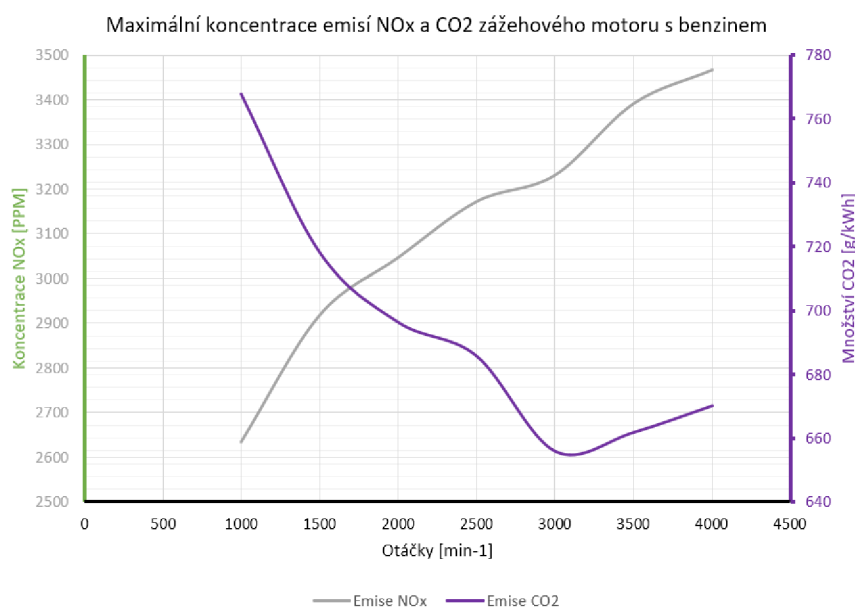
¹⁾ Úhel pootočení klikové hřídele při shoření 50 % paliva

²⁾ Úhlová vzdálenost pootočení klikové hřídele od shoření 10 do 90 % paliva

Výsledné grafy, zahrnující podávaný výkon, měrnou efektivní spotřebu, točivý moment na hřídeli, produkované množství CO₂, emise NO_x, vše v závislosti na otáčkách, jsou zobrazeny souhrnně na obr. 19 a obr. 20.



Obr. 19: Vnější otáčková charakteristika zážehového motoru spalujícího benzin (Zdroj: vlastní)



Obr. 20: Koncentrace emisí NO_x a CO₂ zážehového motoru spalujícího benzin (Zdroj: vlastní)

7.2.2 SPALOVÁNÍ LPG

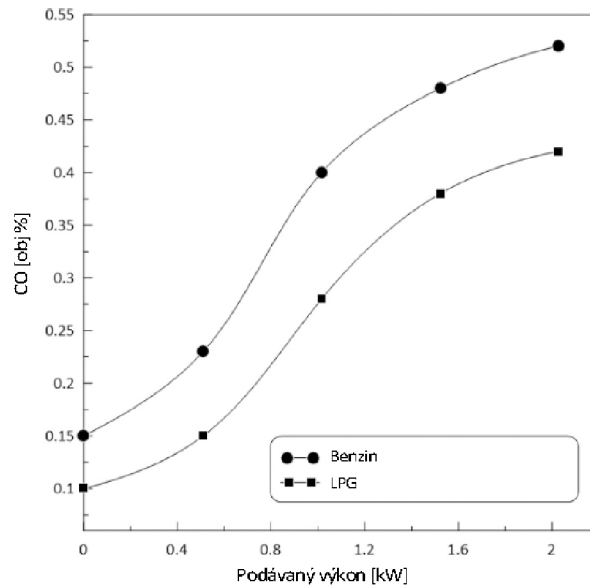
Díky vysokému oktanovému číslu lze při spalování LPG v zážehovém motoru dosáhnout až hodnoty 15 kompresního poměru bez rizika vzniku detonačního spalování, zároveň díky vyšší teplotě vznícení než u benzínu je víc odolné vůči detonačnímu spalování. LPG je sice kapalné palivo, pro spalování se však může využívat také v plynném skupenství, v tom případě je tedy snazší jeho rozptýlení a vytvoření směsi se vzduchem než u kapalného benzínu, díky tomu je jeho zažehnutí rychlejší. Rychlost šíření plamene je udávána kolem hodnoty 0,4 m/s, tedy podobná jako u benzínu [72]. Oproti tomu však při porovnání se spalováním benzínu vykazuje nižší termickou účinnost a podávaný výkon, neboť právě přeměna z kapalného skupenství benzínu na plynné zapříčiňuje ochlazování vzduchu ve válci spotřebovaným latentním teplem, čímž snižuje tepelné ztráty přes stěny válce. Ztráta výkonu oproti použití benzínu se pohybuje kolem 10–20 % v závislosti na druhu motoru, palivovém systému a provozních podmínkách [73], vzhledem k bohatosti směsi je nejvyšší podávaný výkon dosahován při bohatší směsi s hodnotou součinitele přebytku vzduchu λ v rozmezí 0,8–1 [74]. Měrná efektivní spotřeba paliva je v zážehovém motoru oproti použití benzínu nižší, při provozu motoru za chladných podmínek je však spotřeba výrazně vyšší [75]. Protože má LPG nižší obsah uhlíku než benzin, produkuje menší množství emisí CO₂, stejně tak CO, jak je ukázáno na obr. 21, a HC, naopak je zvýšená tvorba oxidů dusíku (NO_x). Porovnání množství vznikajících emisí při spalování LPG vůči benzínu je popsáno v tab. 21.

Tab. 21: Srovnání emitovaných emisí při spalování LPG a benzínu (3,1litrový motor) [2]

	LPG	Benzin
HC (g/km)	0,34	0,60
CO (g/km)	4,10	8,77
NO _x (g/km)	1,08	0,68

Zážehový motor lze také provozovat s využitím duálního paliva, LPG a benzínu. Při pouhých 10 % LPG ve směsi již dochází ke snížení tvorby emisí (vyjma NO_x), snížení měrné efektivní spotřeby, objemová účinnost se však také snižuje; samotná celková účinnost motoru je ovšem

zvýšena [72]. Zajímavostí je spalování LPG s vodou ve formě směsné emulze palivo-voda. Přidaná voda působí příznivě na spalování ve smyslu redukce teploty spalování, mírně zvyšuje točivý moment na hřídeli, výkon a teplotní účinnost, zároveň také může snížit tvorbu emisí NO_x až o téměř 35 % [1].



Obr. 21: Srovnání vzniku emisí CO v závislosti na výkonu motoru [75]

SIMULACE SPALOVÁNÍ LPG

Výchozí podmínky simulace hoření LPG jsou vypsány v tab. 22.

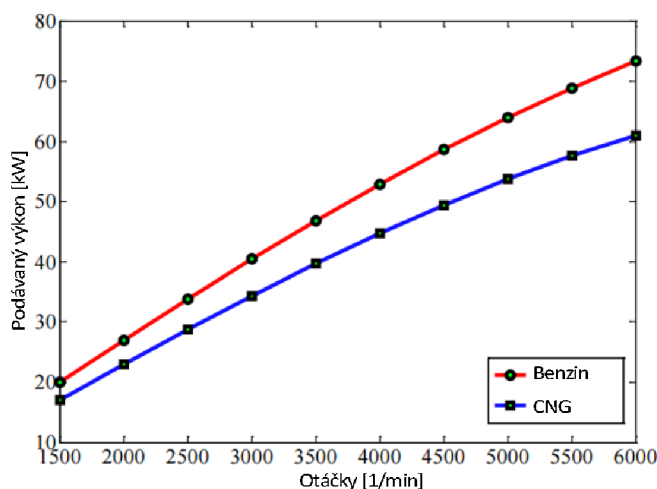
Tab. 22: Vnější podmínky simulace spalování LPG [72], [76]

Wiebeho koeficient	2
Anchor angle (°)	6
Duration (°)	15
Součinitel přebytku vzduchu	0,8
Obsah propanu (obj. %)	60
Obsah butanu (obj. %)	40

7.2.3 SPALOVÁNÍ CNG

CNG je plynné palivo, použití zážehových motorů se zemním plynem tedy vyžaduje mírně odlišný přístup než v případě kapalného benzínu. Proces atomizace, rozptýlení co nejmenších částí paliva do vzduchu, trvá obecně u plynných paliv mnohem kratší čas než u kapalných. Pro CNG je stechiometrický poměr roven 17,2 : 1, kompresní poměr může být až 13 : 1 [74]. Stlačený zemní plyn vyžaduje pro své zažehnutí větší množství energie než benzin, proto chudá směs CNG a vzduchu potřebuje déle trvající zážeh jiskrou. Z hlediska druhů vstřikovacích systémů zážehových motorů bylo experimentálně zjištěno, že pro provozování CNG ve spalovacích motorech je nejvýhodnější z hlediska podávaného výkonu, spotřeby a tvorby emisí použití přímého vstřikování [77]. Co se celkového výkonu týče, v průměru je podávaný výkon motoru při použití CNG nižší přibližně o 10–15 % než u ropného benzínu, což lze vidět na obr. 22,

optimální tepelné účinnosti lze dosáhnout při bohaté směsi se součinitelem přebytku vzduchu λ v rozmezí 0,67–0,77 [2].



Obr. 22: Srovnání výkonu motoru na CNG a na benzin [77]

V kontextu emisí produkují spalovací motory poháněné CNG (LNG) o 10–20 % méně skleníkových plynů než zážehové benzinové motory [77], porovnání lze vidět v tab. 23. Při nízkých otáčkách a zatíženích motoru však kvůli pomalejší rychlosti šíření plamene a vyšší spotřebě energie vyžadované pro vznícení dochází ke vzniku heterogenní směsi ve válci a tím vzniku většího množství emisí CO, NO_x a HC [77].

Tab. 23: Srovnání emitovaných emisí při spalování CNG a benzínu (2,2litrový motor) [2]

	CNG	Benzin
NMVO ¹) (g/km)	0,043	0,13
CO (g/km)	1,63	2,48
NO _x (g/km)	0,16	0,27

¹) Non-methane volatile organic compounds = nebezpečné organické složky vyjma methanu

SIMULACE SPALOVÁNÍ CNG

Výchozí podmínky simulace hoření CNG jsou vypsány v tab. 24.

Tab. 24: Výchozí podmínky simulace spalování CNG [2], [71]

Wiebeho koeficient	2,2
Anchor angle (°)	8
Duration (°)	20
Součinitel přebytku vzduchu	0,77
Obsah methanu (obj. %)	92
Obsah ethanu (obj. %)	4
Obsah propanu (obj. %)	2
Obsah N ₂ (obj. %)	2

7.2.4 SPALOVÁNÍ BIOPLYNU

Bioplyn je typ vysokooktanového plynného paliva, což z něj dělá vhodného kandidáta na použití v zážehových motorech. Ve srovnání s předešlými palivy jako LPG a CNG je však jeho rychlost šíření plamene téměř poloviční, činí přibližně 0,25 m/s [78], teplota vznícení je naopak vysoká, což jej významně omezuje k použití ve vznětových motorech. V průměru má bioplyn také nižší výhřevnost, ta je však výrazně variabilní vzhledem k celkovému složení plynu. Stechiometrický poměr pro bioplyn bývá nižší než u benzínu, neboť bioplyn může mít poměrně vysoký obsah CO_2 , jeho hodnota je tedy významně ovlivněna složením směsi. Rozsah zápalnosti bioplynu se pohybuje v rozmezí 0,83–1,67 součinitele přebytku směsi λ [78].

Bioplyn se dá považovat za palivo s poměrně nízkou tvorbou většiny emisí při svém hoření. Koncentrace CO ve výfukových plynech není téměř žádná, stejně tak jsou ve srovnání s emisemi ze spalování benzínu výrazně redukovány NO_x a HC. Naopak emise CO_2 mohou být vyšší než u spalování benzínu; bioplyn s vysokým obsahem H_2 produkuje více emisí NO_x kvůli dosažené vyšší teplotě spalování [78].

SIMULACE SPALOVÁNÍ BIOPLYNU

Výchozí podmínky simulace hoření bioplynu jsou vypsány v tab. 25.

Tab. 25: Výchozí podmínky simulace spalování bioplynu [38], [71]

Wiebeho koeficient	2,2
Anchor angle (°)	8
Duration (°)	35
Součinitel přebytku vzduchu	0,83
Obsah methanu (obj. %)	95
Obsah CO_2 (obj. %)	3,04
Obsah H_2 (obj. %)	1,87
Obsah N_2 (obj. %)	0,08
Obsah H_2O (obj. %)	0,01

7.2.5 SPALOVÁNÍ SMĚSI BENZINU S ETHANOLEM / METHANOLEM

Přidání ethanolu do směsi s benzinem zvyšuje oktanové číslo paliva a jeho schopnost dosahovat vyššího kompresního poměru motoru a vyšší teploty vznícení [79], zároveň i snižovat nežádoucí emise (konkrétně CO a HC) – protikladem je koncentrace emisí CO_2 , která je zvýšená; a přitom zvyšovat samotný výkon motoru, točivý moment na hřídeli, tepelnou účinnost, v souvislosti s tím také snižovat měrnou efektivní spotřebu – toto však platí pro poměrně nízký podíl ethanolu ve směsi s benzinem, nad 20% podíl ethanolu se začíná projevovat jeho nižší výhřevnost a tedy pokles ve výkonu a točivém momentu [80]. Použití čistého ethanolu (E100) není v současnosti příliš používané, vyžaduje upravení motoru, konkrétně zvýšení kompresního poměru, aby bylo možné dosáhnout ekvivalentního výkonu k zážehovým motorům na benzin kvůli nízké výhřevnosti ethanolu. Zároveň kvůli nízkému tlaku par je obtížné startovat motor za nízkých teplot. Součinitel přebytku vzduchu pro dosažení maximálního výkonu je roven hodnotě 0,85 [81].

Methanol ve směsi s benzinem má menší vliv na teplotu spalování než ethanol, je to z důvodu vyššího podílu hmotnosti benzínu ve směsi s methanolem než s ethanolem při stejném poměrném objemovém množství. Stejně jako ethanol i methanol zvyšuje oktanové číslo směsi, čímž napomáhá předcházet detonačnímu spalování. Také díky většímu latentnímu teplu při odpařování methanolu je objemová účinnost celé směsi vyšší [82]. Pro maximální výkon při použití čistého methanolu je nejvhodnější hodnota součinitele přebytku vzduchu λ v rozmezí 0,63–0,83, tedy bohatá směs s nedostatkem vzduchu [2].

Směs benzínu s ethanolem a methanolem vykazuje nižší podávaný výkon motoru a vyšší měrnou efektivní spotřebu než při použití benzínu. Z hlediska emisí je tvorba CO a HC snížena, výrazně je však zvýšena tvorba emisí NO_x [83].

SIMULACE SPALOVÁNÍ ETHANOLU A SMĚSI BENZINU S ETHANOLEM

Výchozí podmínky simulace hoření čistého ethanolu (E100) jsou vypsány v tab. 26.

Tab. 26: Výchozí podmínky simulace spalování E100 [84]

Wiebeho koeficient	2,25
Anchor angle (°)	11
Duration (°)	22
Součinitel přebytku vzduchu	0,85

Výchozí podmínky simulace hoření směsi ethanolu s benzinem (E85) jsou vypsány v tab. 27.

Tab. 27: Výchozí podmínky simulace spalování E85 [84]

Wiebeho koeficient	2,25
Anchor angle (°)	11
Duration (°)	22
Součinitel přebytku vzduchu	0,8
Obsah ethanolu (obj. %)	85
Obsah benzínu (obj. %)	15

SIMULACE SPALOVÁNÍ METHANOLU A SMĚSI BENZINU S METHANOLEM

Výchozí podmínky simulace hoření čistého methanolu (M100) jsou vypsány v tab. 28.

Tab. 28: Výchozí podmínky simulace spalování M100 [71]

Wiebeho koeficient	2
Anchor angle (°)	8
Duration (°)	25
Součinitel přebytku vzduchu	0,76

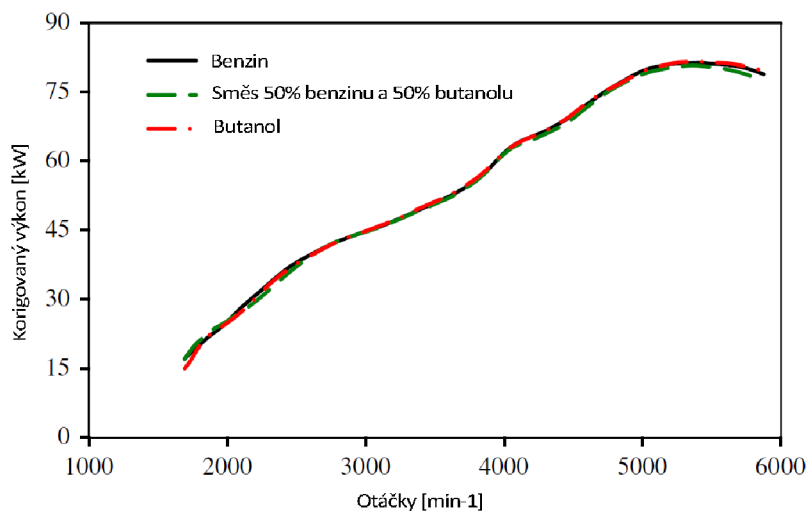
Výchozí podmínky simulace hoření směsi methanolu s benzinem (M85) jsou vypsány v tab. 29.

Tab. 29: Výchozí podmínky simulace spalování M85 [71]

Wiebeho koeficient	2
Anchor angle ¹⁾ (°)	8
Duration ²⁾ (°)	25
Součinitel přebytku vzduchu	0,8
Obsah methanolu (obj. %)	85
Obsah benzínu (obj. %)	15

7.2.6 SPALOVÁNÍ BIOBUTANOLU

Butanol se řadí do skupiny alkoholů, oproti jiným alkoholům se může pyšnit vysokou výhřevností, vysokým generovaným výkonem ve spalovacích motorech a nízkou spotřebou. Větší množství potřebného tepla pro výpar vede k razantnějšímu snížení teploty ve válci, což je výhodné pro sací systém motoru, naopak při studeném startu tato vlastnost může vytvářet problémy. Oproti benzínu disponuje vyšším oktanovým číslem a je tedy možné využít vyššího kompresního poměru. Rychlost šíření plamene je udávána vyšší než u benzínu, butanol také disponuje širším rozsahem zápalnosti, takže je schopen dosáhnout hoření při chudších směsích [43].



Obr. 23: Srovnání výkonu motoru na benzin, směs benzínu s butanolem a čistým butanolem [85]

Díky vysokému oktanovému číslu a vysoké výhřevnosti podobné benzínu lze biobutanol téměř bez problému použít v zážehových spalovacích motorech, konkrétně v motorech s přímým vstřikem. Zde dle experimentů vykazuje butanol podobné hodnoty podávaného výkonu, což lze pozorovat např. na obr. 23, mírně nižší točivý moment na hřídeli, a nižší maximální dosaženou teplotu při hoření. Při vysokých tlacích ve válci však nastává problém nestability spalování, jako jsou kupříkladu nežádoucí pulzace [85]. Z hlediska emisí lze při použití biobutanolu v zážehovém motoru pozorovat výrazné snížení tvorby emisí NO_x a nespálených uhlovodíků, díky většímu podílu kyslíku v alkoholu je snížen vznik emisí CO a CO₂ [43].

7.2.7 SPALOVÁNÍ VODÍKU

Vodík je poměrně specifické palivo, odlišné od ropného benzínu a nafty. Vodík má téměř třikrát vyšší výhřevnost než benzin, naopak disponuje velice nízkou hustotou, což činí problémy jak při jeho distribuci a uchovávání, tak také využitelnosti a spotřebě v motoru. Vyšší teplota vznícení umožňuje dosažení vyššího kompresního poměru u zážehových motorů, u vznětových však omezuje použití čistého vodíku jako paliva. Směs vodíku a vzduchu má kupříkladu oproti benzínu se vzduchem téměř 10krát vyšší rychlost spalování, činící 3 m/s [2]. Energie nutná k zapálení je téměř o řád nižší než u benzínu, což umožňuje provozování spalování vodíku ve spalovacích motorech při velmi chudé směsi, velký problém však může představovat předčasné zapálení od rozžhavených částí motoru nebo od zbytkových spalin. Rozsah zápalnosti vodíku je velice široký, jeho spalování lze provozovat při hodnotách součinitele přebytku vzduchu λ v rozmezí 0,1–14,3 [2]. Vzhledem k provozním podmínkám je schopen motor spalující vodíkové palivo produkovat téměř nulové emise, ale v případě nevyhovujících podmínek také velké množství emisí NO_x a stopové množství CO , CO_2 a jiných oxidů uhlíku, vznikajících hořením oleje prosakujícího do spalovacího prostoru motoru. Pro redukci NO_x se používá technologie EGR a chudých směsí [2].

Kvůli již výše zmíněné teplotě vznícení není v podstatě možné využít čistý vodík pro spalování ve vznětovém motoru. Pro jeho použití je tedy nutná přítomnost paliva s nízkou teplotou vznícení, kupříkladu nafty. Palivo s nízkou teplotou vznícení je vstříknuto do válce, přičemž se samo vznítí a zažehne směs vodíku se vzduchem. Využití tzv. duálního paliva ve vznětovém motoru dokáže snížit jeho kouřivost až o 50 % [7]. Emise nespálených uhlovodíků nejsou použitím vodíku v podstatě ovlivněny, naopak negativně ovlivněn je vznik emisí NO_x – tomu může být zamezeno instalací EGR systému, jeho použití však může snižovat tepelnou účinnost motoru. Díky EGR jsou však také sníženy emise CO , CO_2 i HC [7].

7.2.8 SPALOVÁNÍ SYNTETICKÉHO BENZINU

Syntetický benzin vyrobený technologiemi MTG a ETG je produkován za účelem nahrazení konvenčního benzínu z fosilních zdrojů, a tedy připodobnit výsledný produkt co nejvíce původnímu ropnému palivu. Z tohoto důvodu je výhřevnost syntetických benzinů vzhledem ke konvenčnímu v podstatě shodná, ETG disponuje také podobným oktanovým číslem, MTG jej má mírně vyšší, což je zapříčiněno zvýšeným obsahem parafinů ve směsi. Zvýšený obsah arenů v ETG palivu je důvodem snížení rychlosti šíření plamene, což může přispět ke zvýšení tvorby pevných částic ve výfukových emisích automobilu oproti použití konvenčního benzínu [62].

7.3 SPALOVÁNÍ VE VZNĚTOVÉM MOTORU

7.3.1 SPALOVÁNÍ NAFTY

Spalování nafty ve vznětových motorech se od spalování benzínu liší třemi nejzásadnějšími rozdíly – kompresním poměrem, jenž je vyšší, způsobem komprese, neboť je při ní stlačován pouze vzduch přítomný ve válci, a vždy se jedná o chudou (nadstechiometrickou) směs, tedy $\lambda > 1$ – běžně se hodnota součinitele pohybuje v rozmezí 1,2 až 5. Spalovaná směs je heterogenní, proces spalování není jako u zážehových motorů řízen škrticí klapkou neboli množstvím nasávaného vzduchu, ale množstvím vstříkovaného paliva a délkou samotného vstříku. Uběhlý čas mezi vstříknutím paliva a jeho samovznícením je nazýván jako prodleva vznícení, pohybuje se v řádu jednotek milisekund [4].

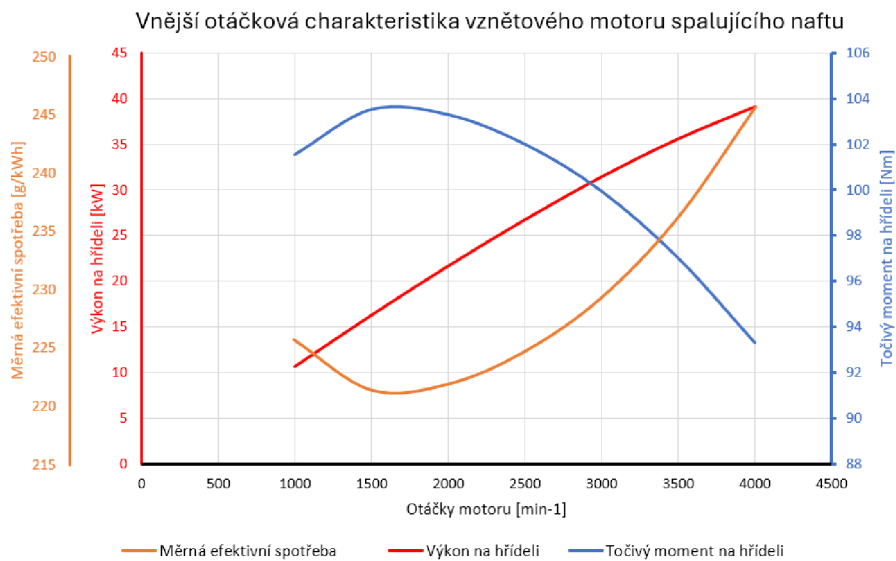
SIMULACE SPALOVÁNÍ NAFTY

Pro simulaci průběhu hoření nafty byl využit základní model v programu GT-Suite, pro niž jsou definované vstupní podmínky popsány v tab. 30.

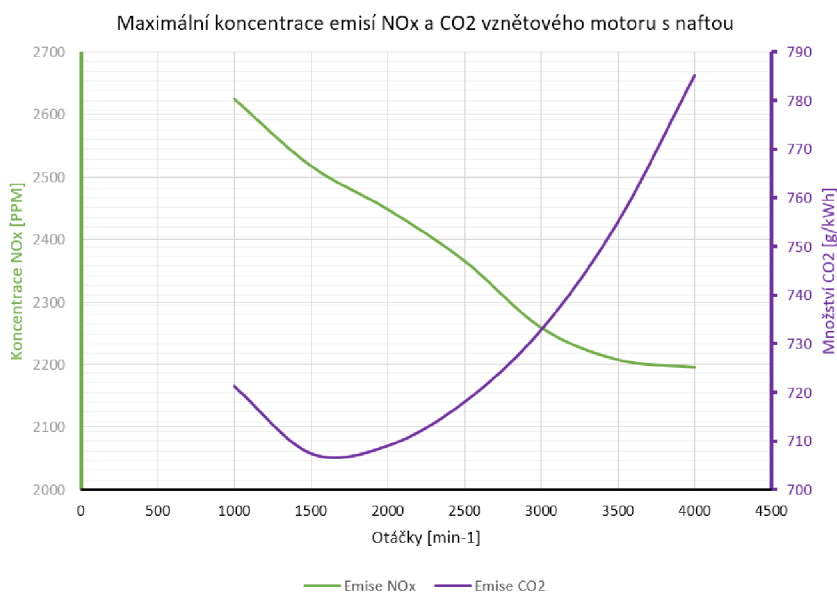
Tab. 30: Vstupní podmínky simulace spalování nafty

Prodleva vznícení (°)	3
Délka spalování (°)	35
Množství vstřikovaného paliva (mg)	80
Délka vstřiku (°)	18

Výsledné grafy, obdobně jako v kapitole 7.2.1, jsou zobrazeny na obr. 24 a obr. 25.



Obr. 24: Vnější otáčková charakteristika vznětového motoru spalujícího naftu (Zdroj: vlastní)



Obr. 25: Koncentrace emisí NO_x a CO₂ vznětového motoru spalujícího naftu (Zdroj: vlastní)

7.3.2 SPALOVÁNÍ BIONAFTY

Bionafta se od konvenční ropné nafty liší výchozím přírodním zdrojem, ale také fyzikálními a chemickými vlastnostmi, například viskozitou. Ta je v procesu spalování poměrně zásadní, neboť ovlivňuje tvorbu směsi se vzduchem a odpařování paliva. Bionafta vyrobená z řepkového oleje (MEŘO) má viskozitu poměrně vysokou díky vysokému stupni nenasycenosti [41], což má neblahý dopad na úplnost hoření a tím také podávaný výkon motoru, krouticí moment a další charakteristiky motoru. S tím se pojí také moment vznícení paliva, který je u MEŘO později v porovnání s např. bionaftou ze slunečnicového či sójového oleje – prodleva vznícení u MEŘO může činit v přepočtu na pootočení klikového hřídele až 3° [86].

V kontextu produkovaných emisí však bylo zjištěno [86], že zvýšená kinematičká viskozita napomáhá snížení tvorby škodlivých emisí NO_x , které v největších množstvích vznikají v místech se směsí bohatou na kyslík (tedy chudou směsí) při vysokých teplotách. V porovnání s ropnou naftou je však emisí NO_x produkováno více právě kvůli zvýšené teplotě spalování, naopak produkce emisí skleníkových plynů CO a CO_2 je nižší než při spalování nafty. Tvorba emisí HC je při malém zatížení vznětového motoru nižší než u nafty, se zvyšujícím se zatížením se však produkce nespálených uhlovodíků zvyšuje [87].

7.3.3 SPALOVÁNÍ SYNDIESELU

Syntetický diesel má oproti konvenční naftě nižší hustotu a viskozitu, čímž je ovlivněna vstříkovací soustava vznětového motoru – vstřík syndieselu je uskutečňován s nižším tlakem a později, prodleva vznícení je oproti ropné naftě kratší. Celková doba spalování však probíhá v delším časovém úseku. Pro dosažení optimální tepelné účinnosti, která může dosahovat vyšších hodnot než při spalování nafty, je důležité variabilní časování vstříku (např. systém common rail) [88]. S tím se také pojí měrná efektivní spotřeba, jež je mírně nižší oproti naftě.

Díky čistotě syndieselu vzniká při jeho spalování méně emisí CO a HC než u běžné konvenční nafty, podíl na tom má převážně větší poměr vodíku ku uhlíku a vyšší cetanové číslo, které umožňuje kratší prodlevu vznícení a tím pádem zvyšuje tepelnou účinnost celého cyklu [64].

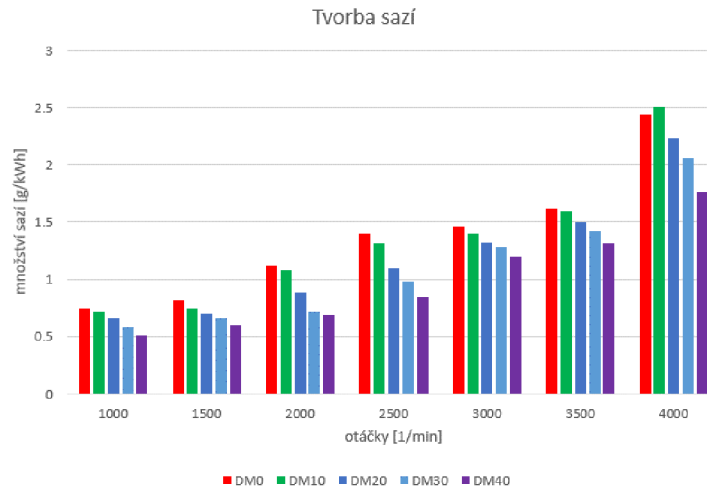
7.3.4 SPALOVÁNÍ BIOBUTANOLU

Použití čistého biobutanolu ve vznětovém motoru s sebou přináší problémy, neboť ve srovnání s naftou má butanol mnohem delší prodlevu vznícení, a následné hoření probíhá extrémně rychle, čímž dochází k rapidnímu nárůstu poměrně vysokého spalovacího tlaku. Mnohem výhodnější je použití biobutanolu ve směsi s naftou, kupříkladu v poměru 60 % biobutanolu a 40 % nafty. Vyšší podíl butanolu ve směsi je omezen jeho vysokým oktanovým číslem a latentním teplem při vypařování, možností navýšení podílu je například použití EGR v motoru, které zároveň napomáhá zachování dostatečné tepelné účinnosti motoru. Butanol ve směsi s naftou má pozitivní účinek na atomizaci paliva ve válci, jeho promíchání se vzduchem, což umožňuje vytvoření homogennější směsi, tím pádem dokonalejší a rychlejší spalování a zamezuje většímu vzniku sazí [43]. V kontextu emisí vykazuje použití butanolu ve vznětových motorech razantní snížení tvorby v podstatě všech nežádoucích emisí [43].

7.3.5 SPALOVÁNÍ SMĚSI NAFTY S METHANOLEM

Díky vyšší rychlosti šíření plamene a vysokému obsahu kyslíku je methanol vhodným směsným palivem také pro vznětové motory. Sice jej kvůli svému příliš nízkému cetanovému číslu nelze použít jako čisté palivo, je však možné jej použít ve směsi s naftou. Právě díky jeho nízkému cetanovému číslu je při zvyšujícím se podílu methanolu ve směsi zvyšována prodleva vznícení

paliva, čímž dochází ke snižování výkonu a točivého momentu motoru, naopak je však přítomnost methanolu spojována se snižováním produkce škodlivých emisí jako NO_x , CO_2 a CO kvůli nízkému obsahu uhlíku a vyššímu podílu kyslíku ve struktuře methanolu [89], stejně tak je snižována produkce sazí, jak je zobrazeno na obr. 26, a je tlumen i přílišný hluk motoru [90].



Obr. 26: Srovnání tvorby sazí mezi spalování čisté nafty a směsmi nafty s methanolem [90]

Spalování směsi nafty s methanolem je spojeno s vyšším spalovacím tlakem než u čisté nafty, což je spojeno s delší prodlevou vznícení a vyšším latentním teplem při odpařování methanolu. Právě větší množství latentního tepla však také zapříčiňuje nižší maximální teplotu ve válci při spalování, díky čemuž je také zvyšována termická účinnost spalovacího cyklu. I přes zvýšenou prodlevu vznícení je však celková doba spálení směsi ve válci kratší [90]. Kvůli nízké výhřevnosti methanolu je však za účelem dosažení stejného výkonu jako při použití čisté nafty zvýšená měrná efektivní spotřeba [90].

SIMULACE SPALOVÁNÍ SMĚSI NAFTY S METHANOLEM

Pro simulaci hoření směsi nafty s methanolem byly provedeny tři simulace s různými poměry methanolu ve směsi, veškeré podmínky jsou vypsány v tab. 31.

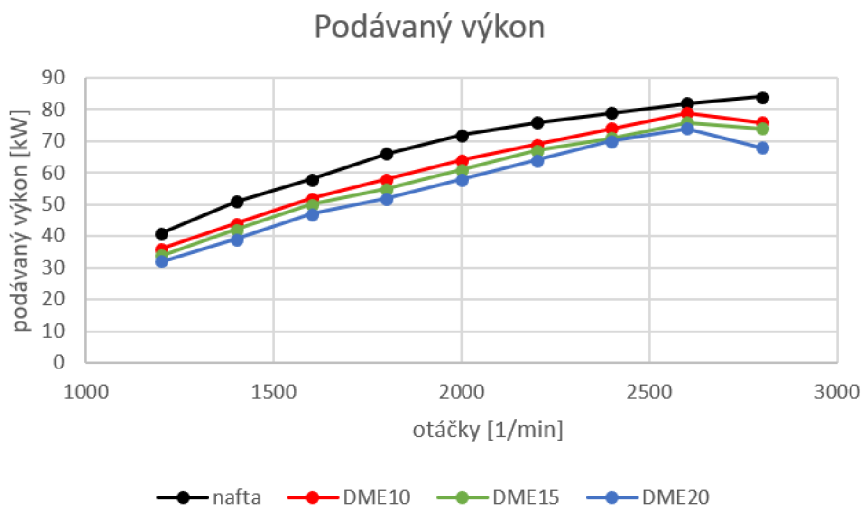
Tab. 31: Výchozí podmínky simulace spalování směsi nafty s methanolem [90]

	DM10	DM30	DM50
Methanol (obj. %)	10	30	50
Prodleva vznícení (°)	5	8	8
Délka spalování (°)	25	25	20
Množství paliva (mg)	80	80	80
Délka vstřiku (°)	18	18	18

7.3.6 SPALOVÁNÍ DME

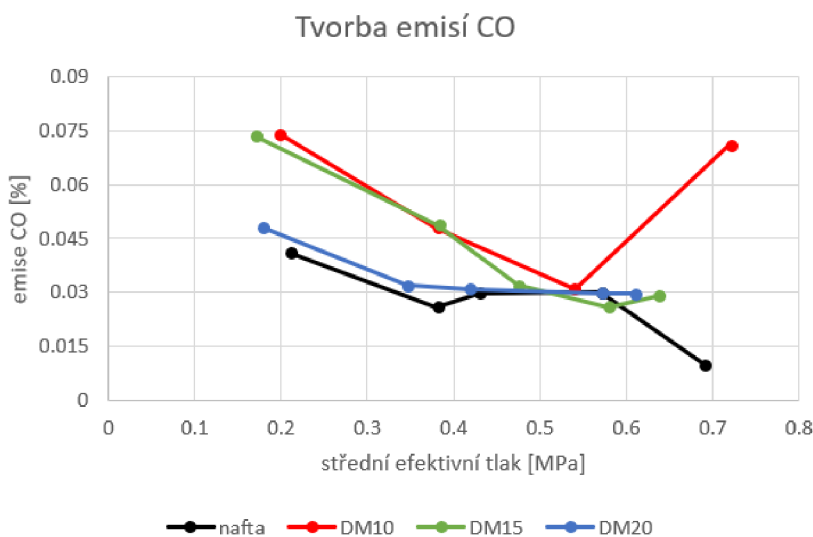
Palivo DME má vyšší cetanové číslo, díky tomu je jeho prodleva vznícení krátká a potřebná teplota pro vznícení nižší než u konvenční nafty. Zároveň oproti naftě probíhá spalování v rychlejším čase. Pro použití DME při vstřikování v kapalném stavu je nutná vysokotlaková vstřikovací soustava, neboť za pokojové teploty a atmosférického tlaku je palivo v plynném skupenství. V důsledku nižší hustoty a viskozity DME vykazuje výrazně lepší možnost atomizace a

vytvoření homogennější směsi než nafta, s čímž se však pojí zhoršená schopnost mazání, která je ve vznětových motorech důležitá a souvisí právě s viskozitou. Nižší výhřevnost způsobuje nižší výkonnost, což lze vidět na obr. 27, kde je znázorněn výkon v závislosti na otáčkách konvenční nafty a směsi nafty s DME s jeho postupně se zvyšujícím podílem ve směsi.



Obr. 27: Srovnání výkonu motoru na naftu a na směsi nafty s DME [91]

Při použití DME ve vznětových motorech je možné pozorovat snížení dýmivosti a hluku motoru, nicméně emise CO, HC a pevné částice jsou dle spousty experimentů spíše vyšší než u spalování nafty, viz obr. 28, podobně u emisí NO_x je jejich výskyt zvýšen kvůli rapidnímu vzněcování a příliš vysoké teplotě hoření [92], snížení tvorby oxidů dusíku lze docílit kupříkladu vhodnou vstřikovací strategií [93]. Obecně tvorba emisí při použití DME jako alternativní palivo významně závisí na specifikacích daného motoru, palivové soustavy a celkové výchozí podmínky motoru – tedy pro použití DME ve vznětovém motoru původně poháněného naftou je velice důležitá adaptace motoru na nové palivo [91].



Obr. 28: Srovnání tvorby emisí CO při spalování nafty a směsi nafty s DME [91]

SIMULACE SPALOVÁNÍ DME

Pro simulaci hoření DME ve vznětovém motoru jsou výchozí podmínky vypsány v tab. 32.

Tab. 32: Výchozí podmínky simulace spalování DME [91]

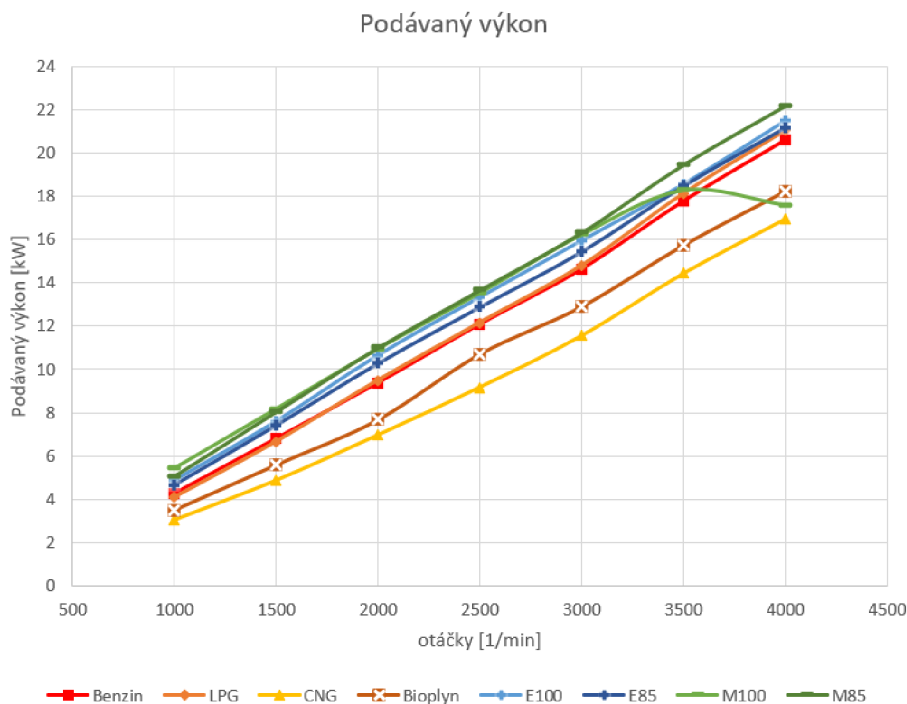
Prodleva vznícení (°)	1
Délka spalování (°)	21
Množství vstříkovaného paliva (mg)	105
Délka vstříku (°)	5

8 ANALÝZA VÝSLEDKŮ SIMULACE

Všechny simulace byly pro zvolené druhy paliv shodně provedeny v rozmezí 1000–4000 otáček motoru. Pro zachování porovnatelnosti nebyly měněny technické specifikace modelů motoru, upravovány byly pouze modely hoření a bylo využito variabilního časování sacího ventilu a vstříkovaní pro dosažení co nejvyššího výkonu a/nebo nejnižší možné spotřeby. Výstupem jsou poté grafy na obr. 28–37 zabývající se porovnáním podávaného výkonu motoru, točivého momentu a měrné efektivní spotřeby, následně také produkcí emisí CO₂ a NO_x.

8.1 VÝSLEDKY SIMULACÍ ZÁŽEHOVÉHO MOTORU

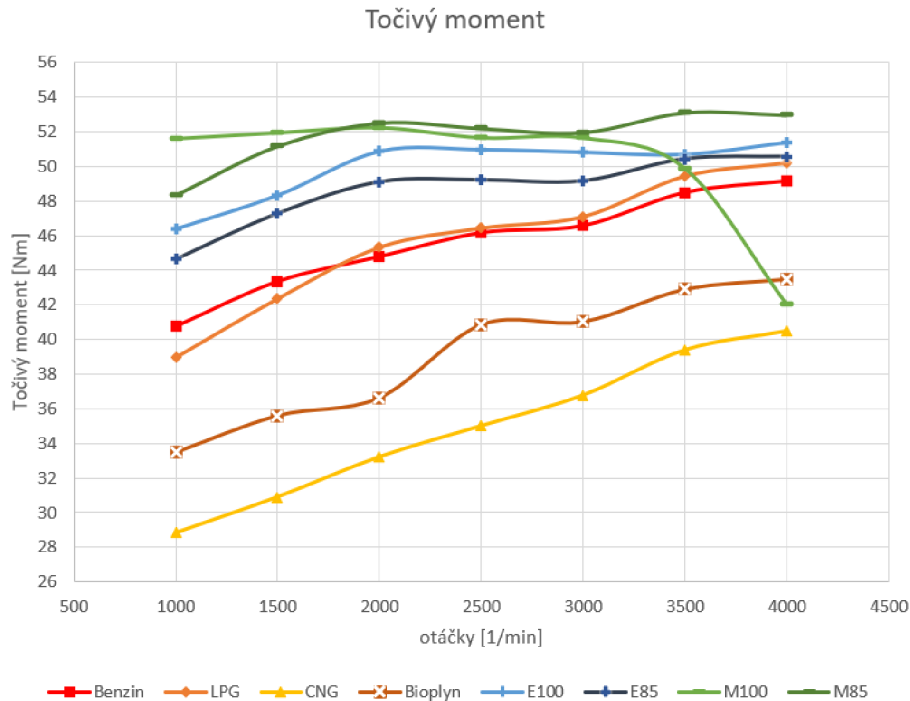
Ze studií [73] vyplývá, že podávaný výkon při spalování LPG je v průměru o 10–20 % nižší než u benzínu. Na obr. 29 a obr. 30 lze pozorovat soulad s tímto tvrzením s ohledem na zvýšenou měrnou efektivní spotřebou LPG, jak lze vidět na obr. 31, jež je v průměru o 10 % vyšší než ta u spalování benzínu. Tím je dosaženo podobného výkonu, jenž je podáván motorem poháněným benzínem. Z grafů zabývajících se emisemi na obr. 32 a obr. 33 lze pozorovat i při zvýšené spotřebě paliva snížení emisí CO₂, které byly nižší v průměru o 42 %; z výsledků plyne také téměř 60krát menší tvorba emisí oxidů dusíku. Zde panuje nesoulad s literaturou [2], ale z experimentů [72], [75] vyplývá mírné snížení těchto emisí, lze tedy předpokládat významnou závislost tvorby emisí NO_x na typu motoru a průběhu spalování, a také možnou nepřesnost a nekompatibilitu použitého výpočtového modelu těchto emisí s tímto palivem.



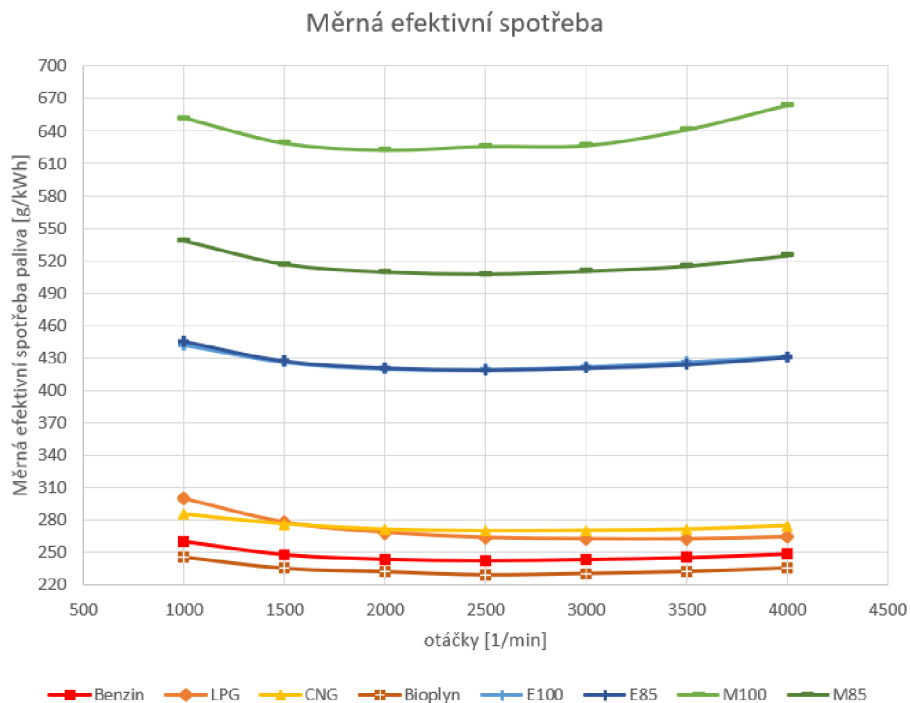
Obr. 29: Podávané výkony alternativních paliv ve srovnání s benzínem (Zdroj: vlastní)

Vzhledem ke složení se dle normy ČSN EN ISO 13443 se zvolený stlačený zemní plyn nachází na dolním limitu tzv. typu H, tedy CNG s vysokým energetickým obsahem [24]. Tato skutečnost a také nižší výhřevnost zapříčinila nízký výkon a točivý moment oproti použití benzínu, jak lze vidět na obr. 29 a obr. 30. Měrná efektivní spotřeba CNG je vyšší o 10 %, obdobně jako u LPG, protože však zemní plyn disponuje nižší výhřevností než ropný plyn, nebylo při zvýšené spotřebě dosaženo takového výkonu. Z hlediska emisí jsou výsledky očekávané, při nižších

otáčkách byla produkce CO_2 i NO_x zvýšena oproti svému průměru, celkově je však tvorba emisí významně nízká oproti užití benzínu, což odpovídá nízké emisivitě spalování CNG.



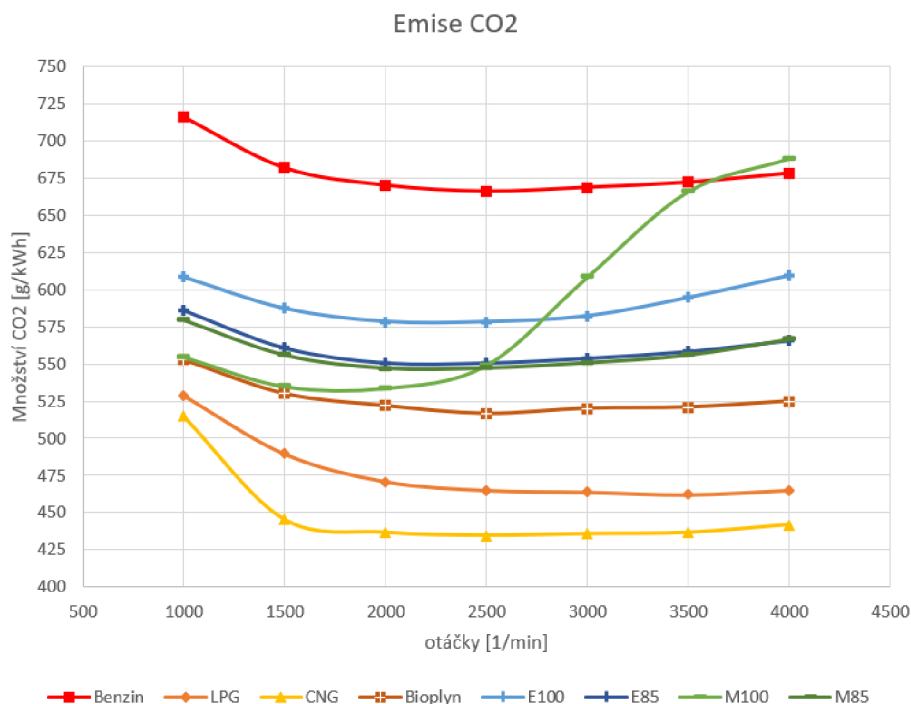
Obr. 30: Točivé momenty alternativních paliv ve srovnání s benzínem (Zdroj: vlastní)



Obr. 31: Měrná efektivní spotřeba alternativních paliv ve srovnání s benzínem (Zdroj: vlastní)

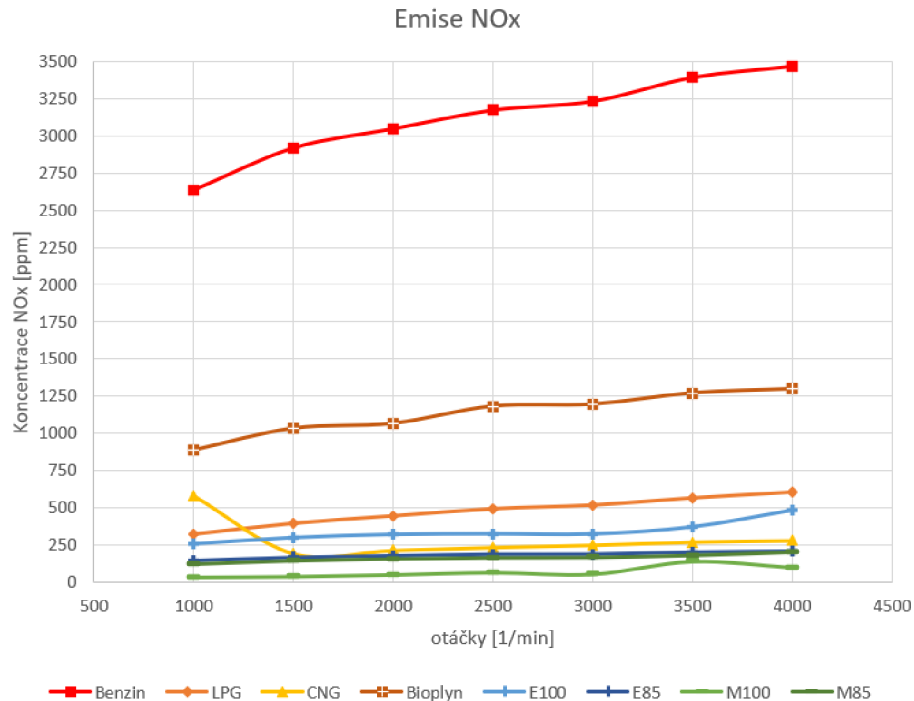
Bioplyn, modelovaný v simulaci hoření, byl zvolen jako vysoce čistý bioplyn, jenž prošel technologií upgradování dle [35]. Právě díky své čistotě a vyššímu obsahu methanu překonal výkonem a točivým momentem průběhy u zemního plynu, oproti benzínu zaostával o necelých 17 %,

jak plyne z obr. 29 a obr. 30. Měrná efektivní spotřeba byla však ve srovnání s benzinem jako jediná nižší ze všech testovaných alternativních paliv, jak lze pozorovat na obr. 31, rozdíl v průměru činil přibližně 6 %. Takovýto rozdíl oproti CNG může být přičítán jak vyššímu podílu methanu ve směsi, tak také přítomnosti vodíku v bioplynu, viz tab. 25, který napomáhá svými fyzikálními a chemickými vlastnostmi docílit lepšího průběhu spalování, neboť zvyšuje teplotu hoření. Z hlediska emisí však právě kvůli zvýšené teplotě hoření vzniká větší množství emisí NO_x ve srovnání se zemním plynem, jak lze pozorovat na obr. 33; emise CO_2 byly nižší než ty u benzínu o téměř 29 % díky vysoké čistotě bioplynu, stále se však pohybovaly ve vyšších hodnotách než u zemního plynu, viz obr. 32.



Obr. 32: Emise CO_2 produkované alternativními palivy ve srovnání s benzinem (Zdroj: vlastní)

Čistý ethanol (E100) dosahoval v průměru o necelých 10 % vyššího výkonu než benzin, což lze připisovat vyššímu oktanovému číslu, ve srovnání s měrnou efektivní spotřebou převyšující spotřebu benzínu v průměru o 70 % je vidět dopad nižší výhřevnosti, kvůli které musela být spotřeba vyšší pro dosažení podobného výkonu a točivého momentu. Vylučované emise CO_2 jsou díky jednoduše struktuře alkoholů a jejich čistotě nižší, jak lze vidět na obr. 32, ještě významnější rozdíl je možné pozorovat na obr. 33 tvorbu emisí NO_x , kde díky obsahu kyslíku ve struktuře ethanolu dochází k dokonalejšímu spalování rychleji a tedy za nižších teplot, kdy se tím pádem tvoří menší množství těchto emisí. Ve spojení s benzinem s 85% podílem (E85) je možné si povšimnout při podobném výkonu a točivém momentu jako u čistého ethanolu a také stejné spotřeby, což je v rozporu s teorií, kdy by měla přítomnost benzínu ve směsi díky jeho vyšší výhřevnosti zapříčinit nižší spotřebu při zachování výkonu – je pravděpodobné, že benzínu je ve směsi příliš málo, než aby byl schopen zvýšit výkonové charakteristiky na úkor spotřeby, vliv benzínu je však vidět u emisí CO_2 , u nichž došlo oproti použití čistého ethanolu ke zvýšení kvůli vyššímu obsahu uhlíku, jenž s sebou přináší benzin, emise NO_x však byly sníženy, jak plyne z obr. 33, tyto výsledky jsou shodné s literaturou [94], neboť přítomnost benzínu způsobuje větší latentní teplo při odpařování, čímž snižuje celkovou teplotu ve válci.



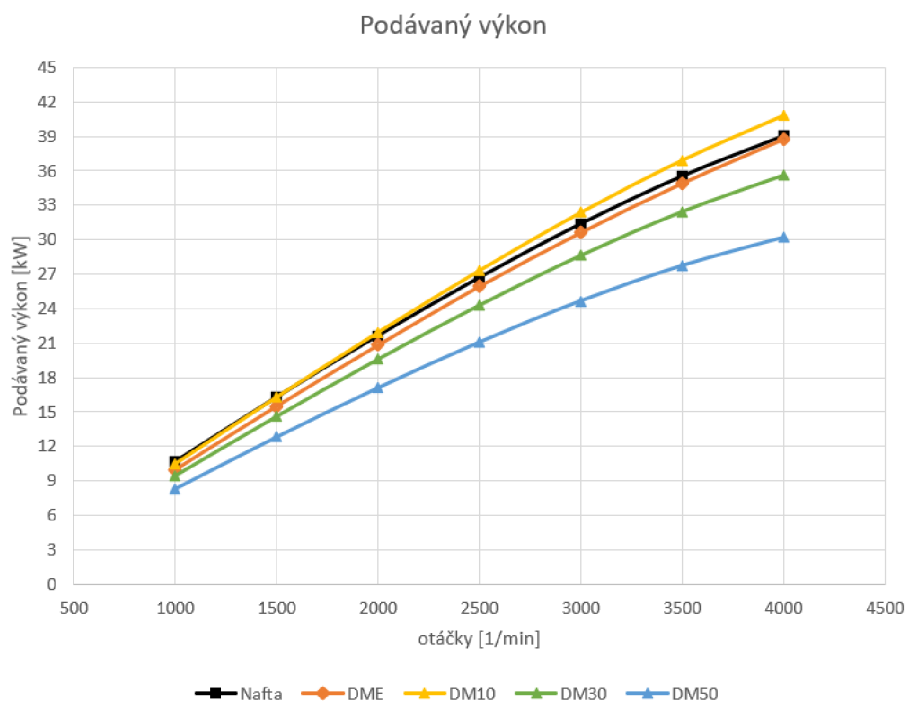
Obr. 33: Emise NO_x produkované alternativními palivy ve srovnání s benzinem (Zdroj: vlastní)

Při použití čistého methanolu (M100) jako paliva zážehového motoru lze pozorovat zvýšení výkonu a točivého momentu o necelých 11 %, to však na úkor spotřeby, která byla oproti spotřebě benzínu 1,5krát vyšší. Tento efekt je způsoben významně nižší výhřevností methanolu oproti benzínu, jak plyne z tab. 7. Z Obr. 29: Podávané výkony alternativních paliv ve srovnání s benzinem (Zdroj: vlastní) obr. 29 a obr. 30 je však zřetelný pokles charakteristik z 3000 na 4000 otáček motoru, což lze připsat velké náchylnosti methanolu na chod motoru – pro použití čistého methanolu v zážehových motorech není vhodné užití motoru dříve užívaného na benzin, jak plyne z výzkumné práce [95], neboť může docházet právě k výkyvům a poklesům výkonových charakteristik i přes optimální (pro používání s benzinem) variabilní časování ventilů a vstřikování. I proto je ve vyšších otáčkách zvýšena produkce emisí CO₂, dokonce přesahující ty při užití benzínu, jak lze vidět na obr. 32. Emise NO_x jsou nejnižší ze všech použitých paliv, což plyne z nízké dosahované teploty spalování methanolu i díky jeho výrazně vysokému latentnímu teplu při vypařování. Při použití směsi methanolu s benzinem (M85) lze vidět navýšení výkonu a točivého momentu proti čistému benzínu, avšak také navýšení spotřeby o 100 %, což plyne z již zmiňované nízké výhřevnosti methanolu. Oproti použití čistého methanolu zde již není žádný pokles výkonových charakteristik při vyšších otáčkách, je také vidět vyšší množství produkovaných emisí CO₂ a NO_x z obr. 32 a obr. 33 kvůli výskytu benzínu v palivu.

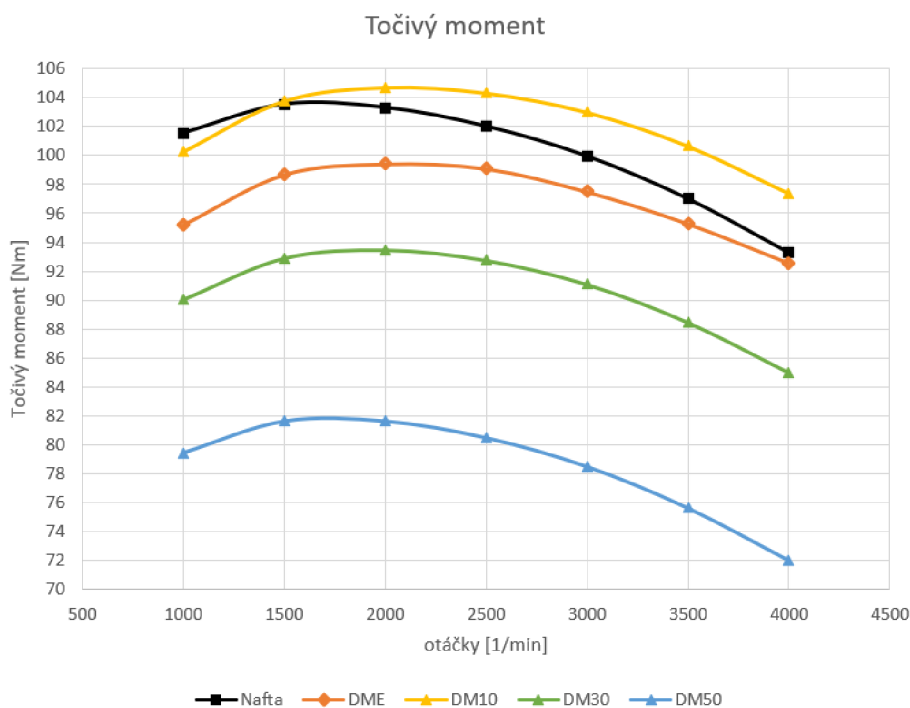
8.2 VÝSLEDKY SIMULACÍ VZNĚTOVÉHO MOTORU

V důsledku nízké výhřevnosti DME (viz tab. 17) je při podobném dosahovaném výkonu a točivém momentu, zobrazenými na obr. 34 a obr. 35, vzhledem k naftě, zvýšena spotřeba o 35 %, jak lze pozorovat na obr. 36. V kontextu emisí byla tvorba CO₂ oproti naftě nižší z důvodu nižšího obsahu uhlíku v palivu, také lze tento výsledek připisovat kratší prodlevě vznícení, díky níž probíhá spalování rychleji, a vzniku homogennější směsi, díky níž je spalování kvalitnější. U emisí oxidů dusíku je na obr. 38 možné vidět nárůst tvorby těchto emisí o přibližně 7 %, což vede k pravděpodobné příčině zvolení nevhodné strategie vstřikování paliva, jak vyplývá

například z [93], neboť DME se vyznačuje vysokou teplotou hoření a razantním vzněcováním podporujícími tvorbu emisí NO_x při spalování.



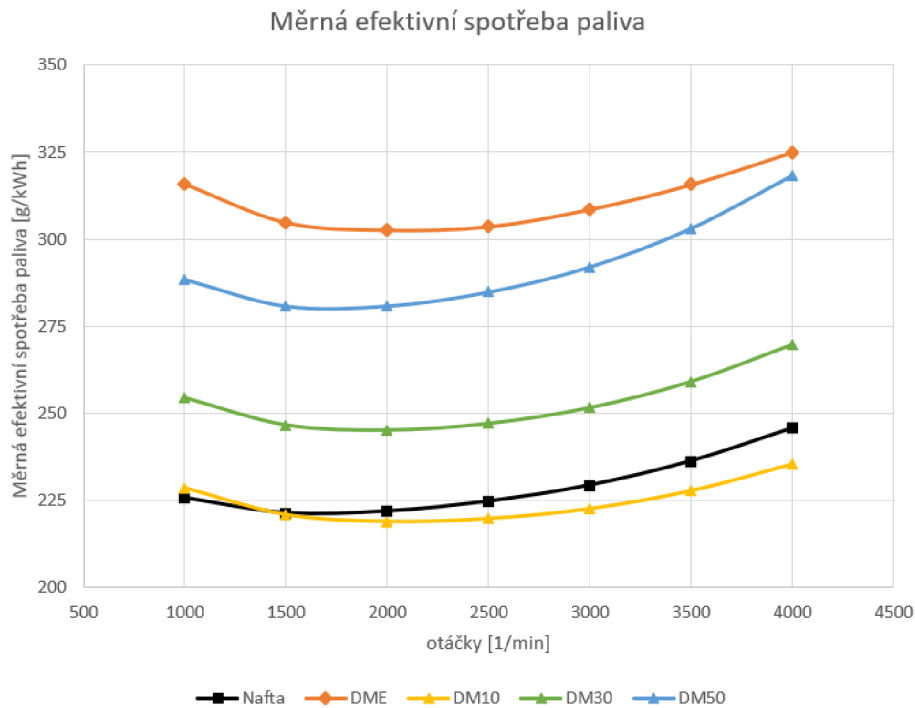
Obr. 34: Podávané výkony alternativních paliv ve srovnání s naftou (Zdroj: vlastní)



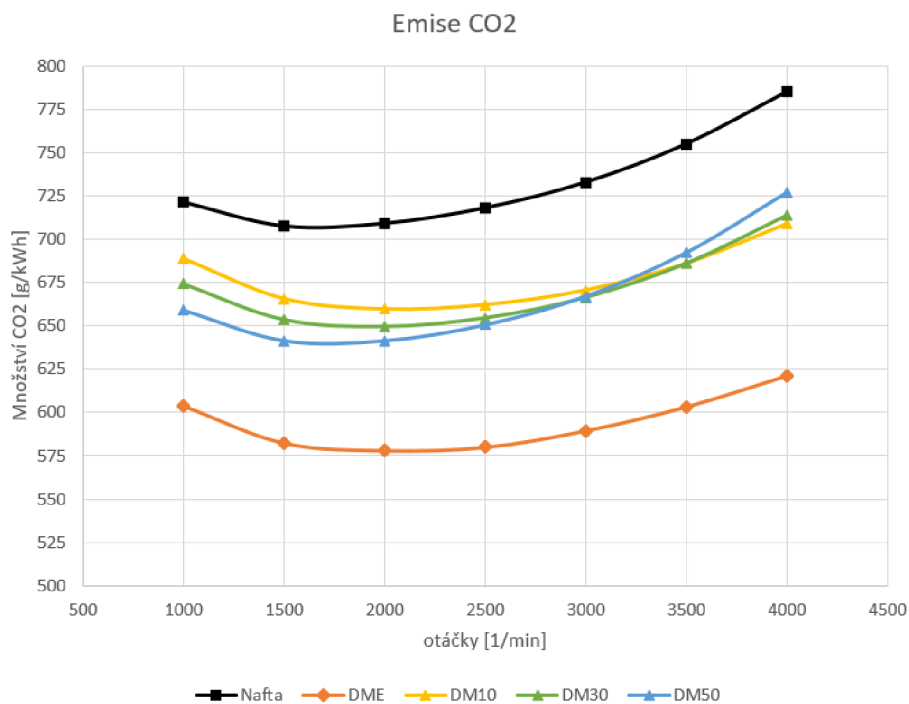
Obr. 35: Točivé momenty alternativních paliv ve srovnání s naftou (Zdroj: vlastní)

Naftové palivo s 10 % methanolu (DM10) v otázce výkonu a točivého momentu bylo srovnatelné s čistou naftou, zároveň samotná měrná efektivní spotřeba palivové směsi byla srovnatelná – rozdíly se pohybovaly maximálně kolem 2 %. V čem však vynikal, je zřetelné na

obr. 37, kde je o téměř 10 % snížena produkce emisí CO₂, za což může menší obsah uhlíku v methanolu a také dokonalejší spalování způsobené vylepšenou atomizací při vstřiku paliva, neboť methanol ve směsi mírně snižuje celkovou viskozitu a hustotu paliva díky své vysoké tekutosti. Vzhledem ke vzniku emisí NO_x, jejichž průběh je znázorněn na obr. 38, je však zřejmé, že tyto emise byly zvýšeny, a to o 40 %. Emise oxidů dusíku potřebují pro svůj vznik vysoké teploty a chudou směs, tedy množství kyslíku větší při stechiometrické směsi; díky obsahu kyslíku přímo v methanolu je spalovaná směs ve válci chudší a tedy příznivější pro vznik emisí NO_x.

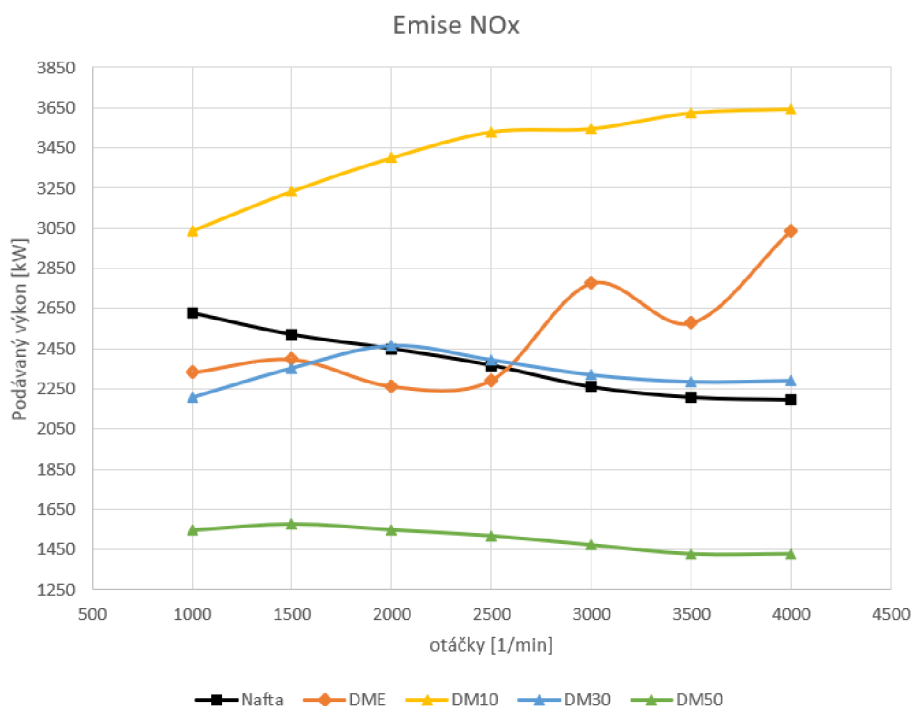


Obr. 36: Měrná efektivní spotřeba alternativních paliv ve srovnání s naftou (Zdroj: vlastní)



Obr. 37: Emise CO₂ produkované alternativními palivy ve srovnání s naftou (Zdroj: vlastní)

Při navýšení podílu methanolu ve směsi na 30 % (DM30) lze vidět snížení výkonnostních charakteristik a navýšení měrné efektivní spotřeby na obr. 34, obr. 35 a obr. 36 z důvodu výrazně nižší výhřevnosti methanolu oproti naftě. Celková tvorba emisí CO_2 se vůči palivu DM10 v podstatě nezměnila, neboť při nízkých otáčkách byla nižší a při vyšších otáčkách vyšší, jak lze pozorovat na obr. 37. Oba tyto rozdíly jsou způsobeny dokonalejším spalováním způsobeném větším množstvím methanolu, které působí při nižší zátěži motoru negativně na vznik emisí oxidu uhličitého a naopak pozitivně při vyšších otáčkách motoru. Tento poznatek je konzistentní například se studiemi [90], [96]. Emise NO_x již byly ve srovnání s palivem DM10 na podobných hodnotách jako při spalování nafty; důvodem je mnohem vyšší latentní teplo při výparu methanolu než u nafty, které ochlazuje stěny válce a snižuje maximální teplotu hoření – zde tato fyzikální vlastnost methanolu převažuje nad účinkem vyššího obsahu kyslíku v jeho struktuře, která naopak tvorbu NO_x podporuje.



Obr. 38: Emise NO_x produkované alternativními palivy ve srovnání s naftou (Zdroj: vlastní)

Při 50% podílu methanolu ve směsi (DM50) již lze vzhledem ke dvěma předchozím směsným palivům pozorovat trend snižování výkonu a točivého momentu a zvyšování měrné efektivní spotřeby se vzrůstajícím podílem methanolu, stejně tak u emisí NO_x , kde dochází k postupnému snižování. Pouze u vylučovaného CO_2 je situace odlišná, při nižších otáčkách se jeho produkce snižuje, při vyšších zvyšuje, v konečném součtu je tedy rozdíl v podstatě zanedbatelný.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provést rešerši o alternativách k současným konvenčním palivům spalovacích motorů a zhodnotit jejich předpokládané a zkoumané důsledky při jejich použití za pomoci provedených počítačových simulací.

Současná alternativní a syntetická paliva pro spalovací motory mají velký potenciál nahradit konvenčně používaná ropná paliva, nicméně nedostatečná infrastruktura (vyjma LPG a taktéž částečně CNG), lišící se od paliva k palivu, častá nutnost konstrukční úpravy nynějších motorů a finančně náročné získávání potřebných surovin jsou překážky bránící většímu rozmachu a velice nízké konkurenceschopnosti těchto paliv. Hlavním hnacím mechanismem vývoje alternativ je primárně snižování škodlivých emisí a zabránění potenciální změny klimatu a ničení životního prostředí, v čemž hraje roli zmiňovaná emisní norma EURO 7. Při použití konvenčních ropných paliv za těchto podmínek je pro výrobce automobilů stále více obtížnější dosažení vhodného poměru mezi produkovanými emisemi a ekonomicky výhodnými vozidly, i proto se spousta automobilek snaží s alternativními či syntetickými palivy experimentovat a představovat je veřejnosti.

Simulace provedené v této práci slouží pro ověření poznatků nasbíraných v rešeršní části. Výsledky byly ve většině případů v souladu s literaturou a očekáváním, což pouze potvrzuje potenciál skrývající se v alternativních palivech. Vzhledem k výsledkům a sesbíraným faktům lze vyslovit prognózu, že slibnou alternativou k ropným palivům je methan, ať už ve formě CNG, LNG či bioplynu, s postupujícím vývojem například technologie upgradování biomethanu lze očekávat jeho masovější využití díky jeho pozitivním projevům v převážně zážehových motorech. Společně s ním je vhodné zmínit také syntetická paliva, o něž se dlouhodobě zajímá spousta výrobců, a která při vylepšení nyní poměrně finančně a energeticky nevýhodných výrobních technologií a technologií získávání zdrojů mohou v budoucnosti představovat konkurenční produkty na poli pohonných hmot. V současnosti je však nejvýhodnější využití směsných paliv, tedy ropná paliva s přísávkou alternativních, neboť tato kombinace vychází z ekonomického i environmentálního hlediska nejvýhodněji.

Vzhledem k celosvětové snaze snižování emisí CO₂ ovšem nelze v dohledné době očekávat výrobu paliv s potenciálem dosažení tzv. uhlíkové neutrality, nejbližší je tomu výroba biopaliv z biomasy se zachytáváním odpadního plynu CO₂, z energetického hlediska je tato technologie zatím velice nevýhodná. Lze předpokládat s přihlédnutím k neustálému vývoji vylepšení těchto technologií na přípustnou úroveň, jež by byla ekonomicky i energeticky výhodná.

Klíčovým poznatkem této práce je nutnost dalšího výzkumu a vývoje v oblasti syntetických a alternativních paliv pro dosažení efektivního a udržitelného provozu spalovacích motorů v budoucnosti. Simulační nástroje, jako je kupříkladu zde využívaný program GT-Suite, představují cenný prostředek pro zkoumání a provádění experimentů potřebných k optimalizaci alternativ a jejich dopadu na výkon a produkované emise. Výsledky této práce mohou nabízet perspektivní směry pro budoucí výzkum těchto paliv a jejich integraci do motorismu jako klíčového prvku přechodu k udržitelnému a konkurenceschopnému dopravnímu průmyslu.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] BIERNAT, Krzysztof. *Alternative Fuels, Technical and Environmental Conditions*. online. 1. vyd. Polsko: Łukasiewicz R&D Network - Automotive Industry Institute, 2016. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/60628>.
- [2] FERGUSON, Colin R. a Allan KIRKPATRICK. *Internal combustion engines: applied thermosciences*. 3. vyd. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, Inc, 2015. ISBN 978-1-118-53331-4.
- [3] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof.Ing.František Vlk,DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2003. ISBN 978-80-238-8756-3.
- [4] STONE, Richard. *Introduction to internal combustion engines*. 4. vyd. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2012. ISBN 978-0-230-57663-6.
- [5] AL-SHAHRANY, Ali S. a Ahmed S. A. HASSAN. Influence of Combustion Chamber Design Parameters and Intake Environments on Spark Ignition Engine Performance and Exhaust Gas Emission. online. *Open Journal of Applied Sciences*, roč. 12 (2022), č. 6, s. 930–943. Dostupné z: <https://doi.org/10.4236/ojapps.2022.126064>.
- [6] Distillation | Definition, Process & Method. online. 2023. In: *Britannica*. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/distillation>. [citováno 2023-11-19].
- [7] VISKUP, Richard (ed.). *Diesel and Gasoline Engines*. online. 1. vyd. London, United Kingdom: IntechOpen, 2020. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/intechopen.75259>.
- [8] VLK, František. *Paliva a maziva motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: Prof.Ing.František Vlk, DrSc, 2006. ISBN 978-80-239-6461-5.
- [9] KUNAMALLA, Alekhya; Swarnalatha MAILARAM; Bhushan S. SHRIRAME; Pankaj KUMAR a Sunil K. MAITY. Chapter 1 - Hydrocarbon biorefinery: A sustainable approach. online. In: MAITY, Sunil K.; Kalyan GAYEN a Tridib Kumar BHOWMICK (ed.). *Hydrocarbon Biorefinery*, s. 1–44. Elsevier, 2022. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823306-1.00004-2>.
- [10] SEAN. *Clean Gas: The Chemistry of Detergents in Gasoline*. 2023-01-31. Dostupné z: FTLOScience, <https://ftloscience.com/chemistry-of-detergents-in-gasoline/>. [citováno 2024-01-26].
- [11] ŠUTA, Miroslav. *Chemické látky v životním prostředí a zdraví*. 1. vyd. Brno: ZO ČSOP Veronica, 2008. ISBN 978-80-87308-00-4.
- [12] Ferrocen. online. *Vesmír*, roč. 101 (2022), č. 50. ISSN 1214-4029. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2022/cislo-1/ferrocen.html>.
- [13] PUBCHEM. Methyl tert-butyl ether. online. In: *PubChem*. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/15413>. [citováno 2024-01-26].

- [14] Vozidla na alternativní palivo – Pohon na svítiplyn. online. In: *LPG-CNG ochrana motoru*. Dostupné z: <https://lpg-cng.ochranamotoru.cz/svitiplynovy-pohon-na-svitiplyn-karbonizace-mestsky-plyn.htm>. [citováno 2023-11-17].
- [15] YEOH, Keat Ping a Chi Wai HUI. Production of town gas from natural gas in Hong Kong for a reduction in cost and greenhouse gas emissions. online. *Journal of Cleaner Production*, roč. 420 (2023), s. 138392. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138392>.
- [16] Alternativní pohon motorových vozidel – Pohon na dřevoplyn. online. In: *LPG-CNG ochrana motoru*. Dostupné z: <https://lpg-cng.ochranamotoru.cz/drevoplynova-vozidla-plavidla-pohon-drevoplyn-drevo-plyn.htm>. [citováno 2023-11-17].
- [17] DECKER, Kris De. Wood Gas Vehicles: Firewood in the Fuel Tank. online. 2010. In: *LOW←TECH MAGAZINE*. Dostupné z: <https://solar.lowtechmagazine.com/2010/01/wood-gas-vehicles-firewood-in-the-fuel-tank/>. [citováno 2023-11-19].
- [18] ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE (ed.). *Wood gas as engine fuel*. FAO forestry paper, 72. Rome: FAO, 1986. ISBN 978-92-5-102436-2.
- [19] *WLPGA Events*. Dostupné z: World Liquid Gas (WLGA), <https://www.worldliquidgas.org/events/wlpga-events/>. [citováno 2024-04-14].
- [20] ŠEBOR, Gustav; Milan POSPÍŠIL a Jan ŽÁKOVEC. Technicko-ekonomická analýza vhodných alternativních paliv v dopravě. online. *biom.cz*. 2006. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/knihovna/technicko-ekonomicka-analyza-vhodnych-alternativnich-paliv-v-doprave>.
- [21] PALMER, Gary. Methane Number. online. *Journal of Natural Gas Engineering*, roč. 2 (2019), s. 134–142. Dostupné z: <https://doi.org/10.7569/JNGE.2017.692506>.
- [22] BRISTOL. *The Wobbe Index and Natural Gas Interchangeability* online. Emerson Process Management. 2007. Dostupné z: <https://metersolution.com/wp-content/uploads/2013/02/wobbe-index.pdf>.
- [23] BASU, Prabir. *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Burlington, MA: Academic Press, 2010. ISBN 978-0-12-374988-8.
- [24] ČSN EN ISO 13443. *Zemní plyn - Standardní referenční podmínky*. 2006. s. 16 s. Třídící znak 38 6110.
- [25] BANG, Jisu. Bioethanol in Brazil: Can It Be a Promising Alternative Energy Source? online. 2021. In: *Earth.Org*. Dostupné z: <https://earth.org/bioethanol-in-brazil/>. [citováno 2024-04-14].
- [26] ČSN ISO 1998-2. *Ropný průmysl - Terminologie - Část 2: Vlastnosti a zkoušky*. 2001. s. 28 s. Třídící znak 65 6000.
- [27] SPEIGHT, James G. *Synthetic fuels handbook: properties, process, and performance*. 2. vyd. New York Chicago San Francisco: McGraw-Hill, 2020. ISBN 978-1-260-12896-3.

- [28] ČSN EN 228 +A1. *Motorová paliva - Bezolovnaté automobilové benziny - Technické požadavky a metody zkoušení*. 2018. s. 16 s. Třídící znak 65 6505.
- [29] Scania's bioethanol engine reduces CO2 emissions. online. In: *Scania Group*. Dostupné z: <https://www.scania.com/group/en/home/newsroom/news/2018/scanias-bioethanol-engine-reduces-CO2-emissions.html>. [citováno 2024-02-06].
- [30] Scania Extending Heavy-Duty Ethanol Engine Technology to Trucks. online. In: *Green Car Congress*. Dostupné z: <https://www.greencarcongress.com/2008/04/scania-extending.html>. [citováno 2024-02-06].
- [31] BROMBERG, L. a W. K. CHENG. *Methanol as an alternative transportation fuel in the US: Options for sustainable and/or energy-secure transportation* online. Sloan Automotive Laboratory, Massachusetts Institute of Technology. 2010. Dostupné z: https://afdc.energy.gov/files/pdfs/mit_methanol_white_paper.pdf. [citováno 2024-04-14].
- [32] PUBCHEM. Methanol. online. In: *PubChem*. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/887>. [citováno 2024-02-06].
- [33] GÜLLÜ, Doğan a Ayhan DEMIRBAŞ. Biomass to methanol via pyrolysis process. online. *Energy Conversion and Management*, roč. 42 (2001), č. 11, s. 1349–1356. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00126-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00126-6).
- [34] CHAKRABORTY, Jyoti Prasad; Satyansh SINGH a Sunil K. MAITY. Chapter 6 - Advances in the conversion of methanol to gasoline. online. In: MAITY, Sunil K.; Kalyan GAYEN a Tridib Kumar BHOWMICK (ed.). *Hydrocarbon Biorefinery*, s. 177–200. Elsevier, 2022. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823306-1.00008-X>.
- [35] GUPTA, Priyank; Caneon KURIEN a Mayank MITTAL. Biogas (a promising bioenergy source): A critical review on the potential of biogas as a sustainable energy source for gaseous fuelled spark ignition engines. online. *International Journal of Hydrogen Energy*, roč. 48 (2023), č. 21, s. 7747–7769. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.195>.
- [36] VRTIŠKA, Martin. Martin Vrtiška: Francie a Švédsko rozjely biometan. Uděláme to i my? online. 2020. In: *Ekolist.cz*. Dostupné z: https://ekolist.cz/cz/ekolist/mesicni-souhrn/martinn-vrtiska-francie-a-svedsko-rozjely-biometan.udelame-to-i-my?utm_source=google.com. [citováno 2024-04-14].
- [37] YADAV, Sanjay; Bimlesh KUMAR a S.S. THIPSE. Effects of Bio-Gas Fuel Composition on Engine Performance. online. *SAE Technical Papers*, roč. 5 (2013). Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2013-26-0011>.
- [38] GOLMAKANI, Ayub; Seyed ALI NABAVI; Basil WADI a Vasilije MANOVIC. Advances, challenges, and perspectives of biogas cleaning, upgrading, and utilisation. online. *Fuel*, roč. 317 (2022), s. 123085. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123085>.
- [39] KNOTHE, Gerhard (ed.). *The biodiesel handbook*. 2. ed. Urbana, Ill: AOCS Press, 2010. ISBN 978-1-893997-62-2.

- [40] ETIM, Anietie Okon; Chiazor Faustina JISIEIKE; Taiwo Hassan IBRAHIM a Eriola BETIKU. Biodiesel and its properties. online. In: Anonym. *Production of Biodiesel from Non-Edible Sources*, s. 39–79. Elsevier, 2022. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824295-7.00004-8>.
- [41] MARTÍNEZ, G.; N. SÁNCHEZ; J. M. ENCINAR a J. F. GONZÁLEZ. Fuel properties of biodiesel from vegetable oils and oil mixtures. Influence of methyl esters distribution. online. *Biomass and Bioenergy*, roč. 63 (2014), s. 22–32. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.034>.
- [42] WINANGUN, Kuntang; Atok SETIYAWAN; Bambang SUDARMANTA; Indah PUSPITASARI a Eniya Listiani DEWI. Investigation on the properties of a biodiesel-hydrogen mixture on the combustion characteristics of a diesel engine. online. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, roč. 8 (2023), s. 100445. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100445>.
- [43] ZHEN, Xudong; Yang WANG a Daming LIU. Bio-butanol as a new generation of clean alternative fuel for SI (spark ignition) and CI (compression ignition) engines. online. *Renewable Energy*, roč. 147 (2020), s. 2494–2521. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.119>.
- [44] TRINDADE, Wagner. *n-Butanol as biofuel: characteristics and evaluation of its application in internal combustion engines through 1D simulation*. 2016.
- [45] SIKORA, Kamil. *Vodík – palivo budoucnosti*. Dostupné z: MM spektrum, <https://www.mmspektrum.com/clanek/vodik-palivo-budoucnosti?fbclid=IwAR2J8sNYpkJdViy-dEbU2MU7zYKEIN0B0Ei5RsARrcJCe5t-hNH0hXR2W6E>. [citováno 2023-11-11].
- [46] DEEPALIKA; Vijay KUMAR a Akhilesh Kumar CHOUDHARY. A comparative review on evaluation of performance, combustion, and emission characteristics of biodiesel blends enriched with hydrogen, additives and their combined effect. online. *Thermal Science and Engineering Progress*, roč. 46 (2023), s. 102185. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102185>.
- [47] ARMAN, A; F Y HAGOS; A A ABDULLAH; R MAMAT; A R A AZIZ et al. Syngas production through steam and CO₂ reforming of methane over Ni-based catalyst-A Review. online. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, roč. 736 (2020), č. 4, s. 042032. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/736/4/042032>.
- [48] GORIMBO, Joshua; Mahluli MOYO a Xinying LIU. Chapter 10 - Oligomerization of bio-olefins for bio-jet fuel. online. In: MAITY, Sunil K.; Kalyan GAYEN a Tridib Kumar BHOWMICK (ed.). *Hydrocarbon Biorefinery*, s. 271–294. Elsevier, 2022. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823306-1.00010-8>.
- [49] ER-RBIB, Hanaâ; Chakib BOUALLOU a François WERKOFF. Production of Synthetic Gasoline and Diesel Fuel from Dry Reforming of Methane. online. *Energy Procedia*, roč. 29 (2012), s. 156–165. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.09.020>.
- [50] İLBAŞ, Mustafa. The use of coal gases as an alternative fuel for energy supply. *International Journal of Energy Studies*, roč. 3 (2017), s. 58–63. ISSN 2717-7513.

- [51] PRADHAN, Anushka; Prashant BARENDAR a Anil KUMAR. Syngas as An Alternative Fuel Used in Internal Combustion Engines: A Review. *Journal of Pure and Applied Science & Technology*, roč. 5 (2015), s. 51–66. ISSN 2249-9970.
- [52] OPEYEMI OTUN, Kabir; Yali YAO; Xinying LIU a Diane HILDEBRANDT. Synthesis, structure, and performance of carbide phases in Fischer-Tropsch synthesis: A critical review. online. *Fuel*, roč. 296 (2021), s. 120689. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120689>.
- [53] PARRAGA, Joel; Kaveh Rajab KHALILPOUR a Anthony VASSALLO. Chapter 7 - Polyfeed and Polyproduct Integrated Gasification Systems. online. In: KHALILPOUR, Kaveh Rajab (ed.). *Polygeneration with Polystorage for Chemical and Energy Hubs*, s. 175–212. Academic Press, 2019. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813306-4.00007-0>.
- [54] AL-SOBHI, Saad A.; Ahmed ALNOUSS a Mohammad ALHAMAD. Techno-economic and environmental assessment of Gasoline produced from GTL and MTG processes. online. In: TÜRKAY, Metin a Rafiqul GANI (ed.). *Computer Aided Chemical Engineering*, s. 1827–1832. 31 European Symposium on Computer Aided Process Engineering. Elsevier, 2021. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88506-5.50283-7>.
- [55] TOMAN, Michael; Aimee E. CURTRIGHT; David S. ORTIZ; Joel DARMSTADTER a Brian SHANNON. Oil Sands and Synthetic Crude Oil. online. In: Anonym. *Unconventional Fossil-Based Fuels*, s. 15–38. 1. vyd. Economic and Environmental Trade-Offs. RAND Corporation, 2008. ISBN 978-0-8330-4564-5. Dostupné z: <https://www.jstor.org/stable/10.7249/tr580ncep.12>.
- [56] HUSSAIN, Nasir. *Synthetic Crude Oil*. 2023-04-12. Dostupné z: The Petro Solutions, <https://thepetrosolutions.com/synthetic-crude-oil/>. [citováno 2024-03-13].
- [57] FRAGA, Gabriel; Nuno BATALHA; Adarsh KUMAR; Thallada BHASKAR; Muxina KONAROVA et al. Chapter 5 - Advances in liquefaction for the production of hydrocarbon biofuels. online. In: MAITY, Sunil K.; Kalyan GAYEN a Tridib Kumar BHOWMICK (ed.). *Hydrocarbon Biorefinery*, s. 127–176. Elsevier, 2022. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823306-1.00009-1>.
- [58] SROKOL, Zbigniew; Anne-Gaëlle BOUCHE; Anton VAN ESTRİK; Rob C. J STRİK; Thomas MASCHMEYER et al. Hydrothermal upgrading of biomass to biofuel; studies on some monosaccharide model compounds. online. *Carbohydrate Research*, roč. 339 (2004), č. 10, s. 1717–1726. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.carres.2004.04.018>.
- [59] KRZYWONOS, Małgorzata; Janusz WOJDALSKI; Adam KUPCZYK a Michał SIKORA. Analysis of properties of synthetic hydrocarbons produced using the ETG method and selected conventional biofuels made in Poland in the context of environmental effects achieved. *Rocznik Ochrona Srodowiska*, roč. 19 (2017).
- [60] BELL, David; Brian TOWLER a Maohong FAN. Chapter 12 - Methanol and Derivatives. online. In: Anonym. s. 353–371. 2011. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2049-8.10012-9>.

- [61] BIERNAT, Krzysztof; Zdzisław CHŁOPEK a Paulina Luiza GRZELAK. Influence of the Use of EtG Synthetic Fuel in Spark-Ignition Engines on Vehicle Fuel Consumption and Pollutant Emissions. online. *Energies*, roč. 16 (2023), č. 17, s. 6273. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en16176273>.
- [62] HUANG, Weidi; Kinoshita KOICHI; Abe YOHIKO; Oguma MITSU HARU a Tanaka KOTARO. Investigation on Fuel Properties of Synthetic Gasoline-like Fuels. online. *International Journal of Automotive Manufacturing and Materials*. 2024-03-27. s. 5. Dostupné z: <https://doi.org/10.53941/ijamm.2024.100005>.
- [63] LABECKAS, Gvidonas a Stasys SLAVINSKAS. Performance and emission characteristics of a direct injection diesel engine operating on KDV synthetic diesel fuel. online. *Energy Conversion and Management*, roč. 66 (2013), s. 173–188. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.10.004>.
- [64] ISMAEL, Mhadi A.; Mohd A. F. ROSLI; A. Rashid A. AZIZ; Salah E. MOHAMMED; Rasheed Adewale OPATOLA et al. Gas to liquid (GTL) role in diesel engine: Fuel characteristics and emission: A review. online. *Cleaner Engineering and Technology*, roč. 18 (2024), s. 100706. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100706>.
- [65] PUTRASARI, Yanuandri a Ocktaeck LIM. Dimethyl Ether as the Next Generation Fuel to Control Nitrogen Oxides and Particulate Matter Emissions from Internal Combustion Engines: A Review. online. *ACS Omega*, roč. 7 (2022), č. 1, s. 32–37. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03885>.
- [66] RITCHIE, Hannah; Pablo ROSADO a Max ROSER. Greenhouse gas emissions. online. *Our World in Data*. 2024-01-05. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>.
- [67] TOWOJU, Olumide A. a Felix A. ISHOLA. A case for the internal combustion engine powered vehicle. online. *Energy Reports*, roč. 6 (2020), s. 315–321. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.082>.
- [68] PRUSSI, Matteo; Marta YUGO; Luis DE PRADA; Monica PADELLA a Robert EDWARDS. *Well-to-wheels report version 5: JEC well to wheels analysis: well to wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*. online. Publications Office of the European Union, 2020. ISBN 978-92-76-20109-0. Dostupné z: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC121213>.
- [69] GHOJEL, J I. Review of the development and applications of the Wiebe function: A tribute to the contribution of Ivan Wiebe to engine research. online. *International Journal of Engine Research*, roč. 11 (2010), č. 4, s. 297–312. Dostupné z: <https://doi.org/10.1243/14680874JER06510>.
- [70] LIU, Jinlong a Cosmin E. DUMITRESCU. Single and double Wiebe function combustion model for a heavy-duty diesel engine retrofitted to natural-gas spark-ignition. online. *Applied Energy*, roč. 248 (2019), s. 95–103. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.098>.
- [71] DRESLER, Pavel a Pavel RICHTÁŘ. Simulation Model of The Singlecylinder Combustion Engine MZ125. *Perners Contact*, (2012), č. 5, s. 80–88. ISSN 1801-674X.

- [72] TALIB HASHEM, Ghufran; Mohamed F. AL-DAWODY a Ioannis E. SARRIS. The characteristics of gasoline engines with the use of LPG: An experimental and numerical study. online. *International Journal of Thermofluids*, roč. 18 (2023), s. 100316. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100316>.
- [73] CAMPBELL, Michael; Łukasz P. WYSZYŃSKI a Richard STONE. Combustion of LPG in a Spark-Ignition Engine. *SAE Transactions*, roč. 113 (2004), s. 628–637. ISSN 0096-736X.
- [74] REZA, Khalid; Wahab AL-ITHAWI; Raid JAWAD a Lina AL-ZUBIDI. The effect of adding NG to LPG on a spark ignition engine. online. *International Journal of Civil, Mechanical and Energy Science (IJCMES)*, roč. 3 (2017), s. 166–173. Dostupné z: <https://doi.org/10.24001/ijcmes.3.3.2>.
- [75] HASHEM, Ghufran Talib a Mohamed F. AL-DAWODY. Investigation study for the effect using LPG on characteristics of gasoline engine. online. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, roč. 21 (2023), č. 5, s. 1642–1657. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/14484846.2021.2023397>.
- [76] SABARIAH BINTI MUHAMMAD, Siti a Rosli Bin ABU BAKAR. Spark ignition engine performance analysis of liquefied petroleum gas. online. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, roč. 788 (2020), č. 1, s. 012065. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/788/1/012065>.
- [77] CHALA, Girma; A.A.R. AZIZ a Ftwi HAGOS. Natural Gas Engine Technologies: Challenges and Energy Sustainability Issue. online. *Energies*, roč. 11 (2018), s. 2934. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en11112934>.
- [78] QIAN, Yong; Shuzhou SUN; Dehao JU; Xinxing SHAN a Xingcai LU. Review of the state-of-the-art of biogas combustion mechanisms and applications in internal combustion engines. online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 69 (2017), s. 50–58. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.059>.
- [79] MEDVEDEV, Mikhail; Amangeldy SHAIKHMETOV; Aleksei BERESNEV a Maksim BERESNEV. Prospects of New Binary Fuel Mixtures for IC Engines. online. In: *ICMCE '16: 5th International Conference on Mechatronics and Control Engineering*. Venice Italy, 14. 12. 2016. ACM. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/3036932.3036945>.
- [80] SURESH, Devunuri a Ekambaram PORPATHAM. Influence of high compression ratio on the performance of ethanol-gasoline fuelled lean burn spark ignition engine at part throttle condition. online. *Case Studies in Thermal Engineering*, roč. 53 (2024), s. 103832. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103832>.
- [81] SUTHISRIPOK, Tongchit. The Use of E100 to Fuel a Used 4-Stroke Motorcycle. online. *American Journal of Applied Sciences*, roč. 9 (2012), s. 647–653. Dostupné z: <https://doi.org/10.3844/ajassp.2012.647.653>.
- [82] ABU-ZAID, M.; O. BADRAN a J. YAMIN. Effect of Methanol Addition on the Performance of Spark Ignition Engines. online. *Energy & Fuels*, roč. 18 (2004), č. 2, s. 312–315. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/ef030103d>.

- [83] LI, Shu-hao; Zhenhua WEN; Junxing HOU; Shuanghui XI; Pengya FANG et al. Effects of Ethanol and Methanol on the Combustion Characteristics of Gasoline with the Revised Variation Disturbance Method. online. *ACS Omega*, roč. 7 (2022), č. 21, s. 17797–17810. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00991>.
- [84] YELIANA, Yeliana; C. COONEY; J. WORM; D. J. MICHALEK a J. D. NABER. Estimation of double-Wiebe function parameters using least square method for burn durations of ethanol-gasoline blends in spark ignition engine over variable compression ratios and EGR levels. online. *Applied Thermal Engineering*, roč. 31 (2011), č. 14, s. 2213–2220. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.01.040>.
- [85] IRIMESCU, Adrian. Performance and fuel conversion efficiency of a spark ignition engine fueled with iso-butanol. online. *Applied Energy*, roč. 96 (2012), s. 477–483. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.012>.
- [86] E, Jiaqiang; Teng LIU; W. M. YANG; Jing LI; Jinke GONG et al. Effects of fatty acid methyl esters proportion on combustion and emission characteristics of a biodiesel fueled diesel engine. online. *Energy Conversion and Management*, roč. 117 (2016), s. 410–419. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.021>.
- [87] ABED, K. A.; M. S. GAD; A. K. EL MORSI; M. M. SAYED a S. Abu ELYAZEED. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. online. *Egyptian Journal of Petroleum*, roč. 28 (2019), č. 2, s. 183–188. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2019.03.001>.
- [88] ABU-JRAI, A.; A. TSOLAKIS; K. THEINNOI; R. CRACKNELL; A. MEGARITIS et al. Effect of Gas-to-Liquid Diesel Fuels on Combustion Characteristics, Engine Emissions, and Exhaust Gas Fuel Reforming. Comparative Study. online. *Energy & Fuels*, roč. 20 (2006), č. 6, s. 2377–2384. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/ef060332a>.
- [89] LIU, Jinping; Guangzhao GUO a Mingrui WEI. Effects of Methanol Addition on the Combustion Process of the Methanol/Diesel Dual-Fuel Based on an Optical Engine. online. *Energies*, roč. 16 (2023), č. 24, s. 7946. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en16247946>.
- [90] ZHANG, Zhiqing; Jie TIAN; Jiangtao LI; Hongchen JI; Dongli TAN et al. Effects of Different Mixture Ratios of Methanol-Diesel on the Performance Enhancement and Emission Reduction for a Diesel Engine. online. *Processes*, roč. 9 (2021), č. 8, s. 1366. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/pr9081366>.
- [91] STEPANENKO, Denys a Zbigniew KNEBA. DME as alternative fuel for compression ignition engines – a review. online. *Combustion Engines*, roč. 177 (2019), č. 2, s. 172–179. Dostupné z: <https://doi.org/10.19206/CE-2019-230>.
- [92] KIM, Myung Yoon; Seung Hyun YOON; Bong Woo RYU a Chang Sik LEE. Combustion and emission characteristics of DME as an alternative fuel for compression ignition engines with a high pressure injection system. online. *Fuel*, roč. 87 (2008), č. 12, s. 2779–2786. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.01.032>.
- [93] PARK, Su Han a Chang Sik LEE. Combustion performance and emission reduction characteristics of automotive DME engine system. online. *Progress in Energy and*

- Combustion Science*, roč. 39 (2013), č. 1, s. 147–168. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2012.10.002>.
- [94] MASUM, B. M.; H. H. MASJUKI; M. A. KALAM; I. M. RIZWANUL FATTAH; S. M. PALASH et al. Effect of ethanol–gasoline blend on NO_x emission in SI engine. online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 24 (2013), s. 209–222. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.046>.
- [95] VERHELST, Sebastian; James Wg TURNER; Louis SILEGHEM a Jeroen VANCOILLIE. Methanol as a fuel for internal combustion engines. online. *Progress in Energy and Combustion Science*, roč. 70 (2019), s. 43–88. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.001>.
- [96] ZAIDI, Asad A.; Salman Abdu AHMED; Song ZHOU; Yongming FENG; Yuanqing ZHU et al. Comparative and numerical evaluation of methanol blends in CI diesel engine. online. In: *2018 IEEE 5th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS)*. Bangkok, Thailand, 11. 2018. IEEE. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICETAS.2018.8629171>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>a</i>	[m]	Délka kliky
ABE	[-]	Způsob fermentace (aceton, butanol, ethanol)
<i>b</i>	[m]	Vrtání válce pístového motoru
B100	[-]	Stoprocentní bionafta
B30	[-]	Směs 30 % bionafty s 70 % nafty
Bio-ETBE	[-]	Bio ethyl terciární butylether
Bio-MTBE	[-]	Bio methyl terciární butylether
BTL	[-]	Biomass-to-liquids
C	[-]	Uhlík
<i>C</i>	[-]	Parametr Wiebeho funkce
C ₂ H ₅ OH	[-]	Ethanol
C ₂ H ₆	[-]	Ethan
C ₃ H ₈	[-]	Propan
C ₄ H ₁₀	[-]	Butan
C ₄ H ₈	[-]	Izobuten
C ₄ H ₉ OH	[-]	Butanol
C ₅ H ₁₂ O	[-]	Methyl terciární butylether
C ₆ H ₁₄ OH	[-]	Ethyl terciární butylether
CČ	[-]	Cetanové číslo
CFPP	[°C]	Bod ucpání filtru
CI	[-]	Compression ignition
CNG	[-]	Stlačený zemní plyn (angl. compressed natural gas)
CO	[-]	Oxid uhelnatý
CO ₂	[-]	Oxid uhličitý
CTL	[-]	Coal-to-liquids
ČR	[-]	Česká republika
DDF	[-]	Diesel Dual Fuel
DM10	[-]	Směs 10 % methanolu s 90 % nafty
DM30	[-]	Směs 30 % methanolu s 70 % nafty
DM50	[-]	Směs 50 % methanolu s 50 % nafty
DME	[-]	Dimethylether
DÚ	[-]	Dolní úvrat'

e	[-]	Eulerovo číslo
E100	[-]	Čistý ethanol (palivo)
E85	[-]	Směs 85 % ethanolu s 15 % benzínu
EGR	[-]	Exhaust Gas Recirculation
ETBE	[-]	Ethyl terciární butylether
ETG	[-]	Ethanol-to-gasoline
FAME	[-]	Methylestery nasycených mastných kyselin
FeTiH ₂	[-]	Vodíkový kovový hydrát
FT	[-]	Fischer-Tropsch
GDI	[-]	Gasoline Direct Injection
GTL	[-]	Gas-to-liquids
GWP	[-]	Potenciál globálního oteplování
GWP ₁₀₀	[-]	Potenciál globálního oteplování pro 100 let
H	[-]	Vodík (značka)
H ₂	[-]	Molekulární vodík
H ₂ O	[-]	Voda
H ₂ S	[-]	Sirovodík
HC	[-]	Uhlovodíky
HCCI	[-]	Homogenous Charge Compression Ignition
HHV	[-]	Spalné teplo (angl. higher heating value)
HMN	[-]	Heptamethylnonan
hmot.	[-]	hmotnostní
HTU	[-]	Hydro thermal upgrading
HÚ	[-]	Horní úvrať
CH ₃ OH	[-]	Methanol
CH ₄	[-]	Methan
l	[m]	Délka ojnice
LCNG	[-]	Liquified / compressed natural gas (stanice)
LNG	[-]	Zkapalněný zemní plyn (angl. liquefied natural gas)
LPG	[-]	Zkapalněný ropný plyn (angl. liquefied petroleum gas)
m	[-]	Charakteristický parametr hoření
M100	[-]	Čistý methanol (palivo)
M85	[-]	Směs 85 % methanolu s 15 % benzínu

MEŘO	[-]	Methylester řepkového oleje
min.	[-]	minimálně
MMA	[-]	Monomethylanilin
MTBE	[-]	Methyl terciární butylether
MTG	[-]	Methanol-to-gasoline
N	[-]	Dusík (značka)
N ₂	[-]	Molekulární dusík
NG	[-]	Zemní plyn (angl. natural gas)
NH ₃	[-]	Čpavek
NMVOC	[-]	Non-methane volatile organic compounds
NO	[-]	Oxid dusnatý
NO ₂	[-]	Oxid dusičitý
NO _x	[-]	Oxidy dusíku
O ₂	[-]	Kyslík
obj.	[-]	objemové
OČ	[-]	Oktanové číslo
PBA	[-]	Polybutelamin
PEA	[-]	Polytheramin
PIBA	[-]	Polyisobutylenamin
PTG	[-]	Power-to-gas
PTL	[-]	Power-to-liquids
RME	[-]	Methylester řepkového oleje (angl. rapeseed methyl ester)
S	[-]	Síra
SI	[-]	Spark ignition
SME	[-]	Methylester sójového oleje (angl. soybean methyl ester)
SV	[-]	Sací ventil
SUME	[-]	Methylester slunečnicového oleje (angl. sunflower methyl ester)
TTW	[-]	Tank-to-wheels
USA	[-]	Spojené státy americké
VV	[-]	Výfukový ventil
WTL	[-]	Waste-to-liquids
WTT	[-]	Well-to-tank
WTW	[-]	Well-to-wheels

WVO	[-]	Odpadní rostlinné oleje (angl. waste vegetable oil)
$x_H(\alpha)$	[-]	Podíl spáleného paliva
y	[m]	Posunutí pístu
α	[°]	Pootočení klikové hřídele
α_d	[°]	Pootočení klikové hřídele při spálení veškerého paliva
η_{ch}	[-]	Chemická účinnost spalování
λ	[-]	Součinitel přebytku vzduchu