

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra jakosti a spolehlivosti strojů**



## **Diplomová práce**

**Vliv směsí hydrogenovaného oleje a motorové nafty na  
provozní parametry vznětového motoru**

**Bc. Miroslav Pressler**

© 2021 ČZU v Praze

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Miroslav Pressler

Technika a technologie v dopravě a spojích  
Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

**Vliv směsí hydrogenovaného oleje a motorové nafty na provozní parametry vznětového motoru**

Název anglicky

**The effect of hydrotreated vegetable oil – diesel fuel blends on operational parameters of compression ignition engine**

---

### Cíle práce

Cílem diplomové práce je shrnout informace týkající se problematiky konstrukce spalovacího motoru a jeho vybraných provozních parametrů, biopaliv a jejich vlivu na motor. V praktické části experimentálně ověřit vliv vybraných směsí hydrogenovaného rostlinného oleje s motorovou naftou na provozní parametry vznětového motoru.

### Metodika

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu (literární rozbor konstrukce současných spalovacích motorů a jednotlivých provozních parametrů, analýza biopaliv a jejich vlivu na motor)
3. Cíl práce
4. Metodika práce (testovací přístroje a zařízení, metodika měření a zatěžování motoru, metodika zpracování a vyhodnocování dat)
5. Výsledky měření (porovnání vlivu směsí hydrogenovaného rostlinného oleje na motorové nafty na vybrané provozní parametry motoru)
6. Závěr

## Doporučený rozsah práce

50-60

## Klíčová slova

motor, biopaliva, hydrogenovaný olej

---

## Doporučené zdroje informací

BAUER, F. *Traktory*. Praha: Profi Press, 2013. ISBN 978-80-86726-52-6.

HEYWOOD, J B. *Internal combustion engine fundamentals*. New York ; Chicago ; San Francisco ; Athens ; London ; Madrid ; Mexico City ; Milan ; New Delhi ; Singapore ; Sydney ; Toronto: McGraw-Hill Education, 2018. ISBN 978-1-260-11610-6.

HROMÁDKO, J. – ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. TECHNICKÁ FAKULTA. *Speciální spalovací motory*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2168-7.

HROMÁDKO, J. *Spalovací motory : komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.

HROMÁDKO, J. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony : komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.

Odborná periodika (databáze Scopus, Web of Science apod..)

Předpisy, normy, firemní literatura

---

## Předběžný termín obhajoby

2020/2021 LS – TF

## Vedoucí práce

Ing. Jakub Čedík, Ph.D.

## Garantující pracoviště

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů

---

Elektronicky schváleno dne 29. 1. 2020

**doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 2. 2020

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

---

V Praze dne 12. 05. 2021

---

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Vliv směsí hydrogenovaného oleje a motorové nafty na provozní parametry vznětového motoru" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne \_\_\_\_\_

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Jakubu Čedíkovi Ph.D. za vřelý přístup, cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěl k vypracování této diplomové práce. Rovněž bych rád poděkoval všem kolegům, kteří se podíleli na laboratorním měření.

## Vliv směsí hydrogenovaného oleje a motorové nafty na provozní parametry vznětového motoru

### **Abstrakt:**

Tato diplomová práce se podrobně zabývá problematikou vznětových motorů a změnami vybraných provozních parametrů v závislosti na typu použitého paliva. Konkrétním zaměřením této práce je stanovení vlivu vybraných směsí hydrogenovaného oleje a motorové nafty na provozní parametry motoru, a to zejména na emise výfukových plynů. V první části této práce nalezneme literární rešerši popisující historii spalovacích motorů a základní principy jejich funkce. Pozornost je taktéž věnována emisím výfukových plynů a možnostem jejich snižování a dále také typům biopaliv vhodných pro spalování vznětovými motory. V praktické části této práce jsou zkoumány konkrétní změny provozních parametrů na testovaném stroji Zetor Forterra 8641, v závislosti na typu použitého experimentálního paliva. Data získaná spalováním testovaných paliv jsou graficky zpracována a porovnávána s hodnotami referenčního paliva motorové nafty. V závěru práce nalezneme hodnocení vlivu jednotlivých paliv na změny provozních parametrů a vhodnosti jejich využití.

**Klíčová slova:** spalovací motor, hydrogenovaný olej, biopaliva, emise

## The effect of hydrotreated vegetable oil – diesel fuel blends on operational parameters of compression ignition engine

### **Abstract:**

This thesis deals in detail with the issue of diesel engines and changes in selected operating parameters depending on the type of fuel used. The specific focus in this work is to determine the effect of selected blends of diesel and hydrogenated oil on engine operating parameters, on exhaust emissions in particular. In the first part of this work we find a literary research describing the history of internal combustion engines and the basic principles of their function. Attention is also paid to exhaust emissions and abatement options, as well as biofuel types suitable for combustion by diesel engines. In the practical part of this work, specific changes in operating parameters on the Zetor Forterra 8641 are examined, depending on the type of experimental fuel used. The data obtained from the combustion of the tested fuels are graphically processed and compared with the values of the diesel reference fuel. At the end of the work we will find an evaluation of the impact of individual fuels on changes to operating paramets.

**Keywords:** combustion engine, hydrotreated vegetable oil, biofuels, emission

## Obsah

<b>1. Úvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Rozbor současného stavu</b> .....	<b>2</b>
2.1. Spalovací motor .....	2
2.1.1. Historický vývoj spalovacího motoru.....	3
2.1.2. Historie vznětového motoru .....	3
2.2. Vznětový motor .....	4
2.2.1. Základní princip fungování vznětového motoru .....	4
2.2.2. Tepelná bilance.....	7
2.3. Přepřínování motorů.....	7
2.3.1. Porovnání přepřínovaných a atmosférických vznětových motorů.....	9
2.4. Emise výfukových plynů .....	10
2.4.1. Oxid uhelnatý .....	11
2.4.2. Oxid uhličitý .....	11
2.4.3. Oxidy dusíku .....	12
2.4.4. Oxidy síry .....	12
2.4.5. Nespálené uhlovodíky .....	12
2.4.6. Pevné částice.....	13
2.5. Zařízení pro úpravu a eliminaci výfukových plynů.....	13
2.5.1. Recirkulace výfukových plynů (EGR) .....	13
2.5.2. Oxidační katalyzátor (DOC).....	14
2.5.3. Filtr pevných částic (DPF).....	14
2.5.4. Selektivní katalytická redukce (SCR).....	14
2.6. Motorová nafta.....	15
2.6.1. Výroba motorové nafty.....	15
2.6.2. Základní vlastnosti motorové nafty .....	16
2.6.3. Destilační křivka motorové nafty .....	18
2.6.4. Požadavky a druhy motorové nafty dle ČSN EN 590+A1 .....	19
2.6.5. Druhy motorových naft dle nízkoteplotních vlastností .....	20
2.7. Bionafta.....	21
2.7.1. Výroba MEŘO.....	22
2.7.2. Výhody a nevýhody použití MEŘO .....	23
2.8. Motorová paliva vyráběná hydrogenací rostlinných olejů a živočišných tuků .....	24
2.8.1. Hydrogenace rostlinných olejů.....	26
2.8.2. Vlastnosti primárních produktů a jejich složení .....	28

2.8.3.	Výroba hydrogenovaných olejů.....	29
2.8.4.	Využití paliv HVO pro vznětové motory .....	30
<b>3.</b>	<b>Cíl práce .....</b>	<b>33</b>
<b>4.</b>	<b>Metodika práce .....</b>	<b>34</b>
4.1.	Postup měření .....	35
4.2.	Měřicí přístroje a zařízení .....	36
4.3.	Použité palivové směsi.....	40
<b>5.</b>	<b>Výsledky měření .....</b>	<b>42</b>
5.1.	Změny emisí výfukových plynů pro konkrétní paliva.....	43
5.1.1.	Emise oxidu uhličitého (CO <sub>2</sub> ) .....	43
5.1.2.	Emise oxidu uhelnatého (CO) .....	44
5.1.3.	Emise formaldehydu (CH <sub>2</sub> O) .....	45
5.1.4.	Emise methanu (CH <sub>4</sub> ).....	46
5.1.5.	Emise acetaldehydu (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O) .....	47
5.1.6.	Emise butadienu (C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> ) .....	48
5.1.7.	Emise oxidu dusnatého (NO) .....	49
5.1.8.	Emise oxidů dusíku (NO <sub>x</sub> ).....	50
5.1.9.	Zastoupení plynů NO a NO <sub>2</sub> v emisích NO <sub>x</sub> .....	51
5.2.	Pevné částice ve výfukových plynech .....	52
5.3.	Teplota výfukových plynů .....	53
5.4.	Měrná spotřeba paliva.....	54
5.5.	Točivý moment a výkon motoru.....	55
<b>6.</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>56</b>
<b>7.</b>	<b>Seznam citovaných zdrojů.....</b>	<b>59</b>
<b>8.</b>	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>62</b>
<b>9.</b>	<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>62</b>
<b>10.</b>	<b>Seznam grafů .....</b>	<b>63</b>
<b>11.</b>	<b>Seznam použitých zkratk.....</b>	<b>63</b>



# 1. Úvod

Již od počátku 20. století tvoří automobilová doprava neodmyslitelnou součást moderní společnosti. Přestože se jedná z hlediska energetické a finanční náročnosti o relativně nákladný způsob dopravy, její flexibilita je doposud kritériem převyšujícím zmiňované nedostatky. Společně s rostoucím počtem provozovaných motorových vozidel ovšem vyvstává otázka týkající se nadměrné spotřeby ropných surovin a zvýšených emisí výfukových plynů. Z těchto důvodů se v současné době setkáváme s neustále zvyšujícími se nároky kladenými na výrobce automobilů, kteří jsou nuceni konstruovat moderní pohonné jednotky vybavené komplikovanými systémy, snižující jejich emisní stopu. Zároveň se setkáváme s neutuchající snahou o nalezení vhodné alternativy za doposud používaná fosilní paliva.

Do popředí zájmu se tak dostávají alternativní paliva produkující menší množství zdraví škodlivých plynů a plynů způsobujících skleníkový efekt. Jako další významný faktor hovořící pro nahrazení doposud konvenčně vyráběných paliv lze uvést nutnost snížení závislosti na ropných produktech. V současné době patří mezi nejvíce uplatňovaná alternativní paliva biopaliva. Stěžejní výhodou těchto paliv je jejich kompatibilita s běžně používanými vznětovými a zážehovými motory, vynikající odbouratelnost a také možnost využití bioodpadů k jejich výrobě. I přes vědeckou snahu o nalezení ideálních alternativních paliv vyhovujících zmiňovaným kritériím, se ovšem stále setkáváme s množstvím problémů, které se týkají především oxidační stability, skladovatelnosti, ekologie výroby nebo také distribuce.

Biopalivům a jejich problematice se věnuje i tato práce, která se zabývá vlivy použitých směsí hydrogenovaného oleje a motorové nafty na provozní parametry vznětového motoru. První část této práce je věnována literární rešerši dané problematiky, která se zaměřuje na historický vývoj spalovacího motoru, jeho konstrukci a princip funkce, emise výfukových plynů a popis jednotlivých typů paliv vhodných pro spalování vznětovými motory. Praktická část této práce představuje experimentální měření vznětového motoru při použití vybraných směsí paliv a jejich následné hodnocení. Hodnocené změny provozních parametrů jsou zaměřeny především na množství vznikajících emisí výfukových plynů, měrnou spotřebu paliva a dále také točivý moment a výkon motoru. V závěru práce nalezneme rekapitulaci zjištěných výsledků a zhodnocení hlavních změn způsobených použitím experimentálních paliv.

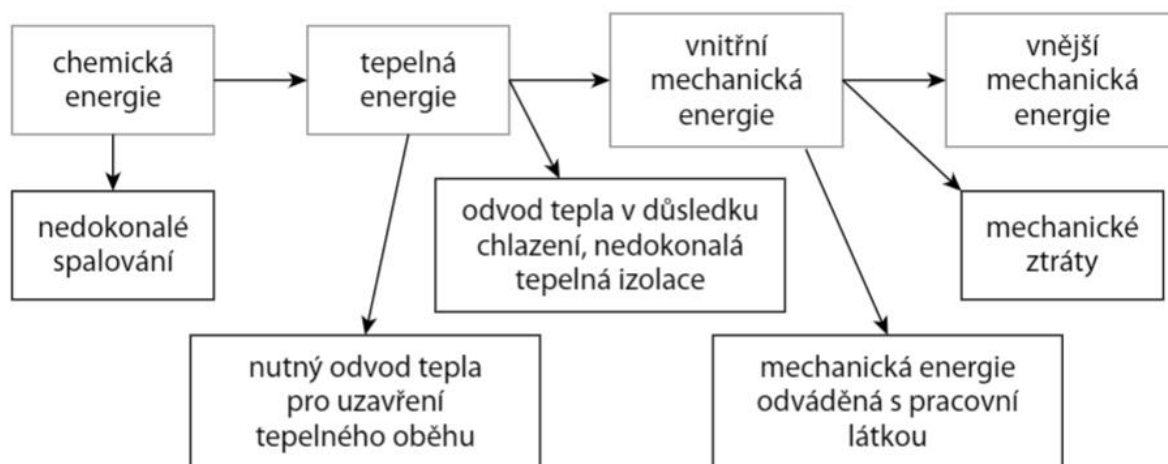
## 2. Rozbor současného stavu

Tato část práce obsahuje literární rozbor současného stavu v oblasti spalovacích motorů. Práce je zaměřena především na motory vznětové a hlavní faktory, které se podílejí na změnách jejich provozních parametrů. Dále je taktéž uvedena problematika emisí výfukových plynů a možná použití alternativních paliv k motorové naftě.

### 2.1. Spalovací motor

Spalovací motor je tepelný stroj, který spalováním paliva získává tepelnou energii a využitím vhodného plynného média ji převádí na mechanickou práci. Vzniklá energie plynného média je využitelná jako energie potenciální (tlak spalin), a to například u pístových spalovacích motorů, nebo energie kinetická (rychlost proudu spalin) u spalovacích turbín. Na obr. 1 je znázorněn základní postup transformace chemické energie obsažené v palivu na mechanickou práci spalovacích motorů. [1]

Palivy pro současné automobilové spalovací motory jsou především benzín a motorová nafta. Jedná se o směsi chemických sloučenin vodíku (H) a uhlíku (C) v různých poměrech. Tyto směsi jsou označovány jako uhlovodíky (HC). Během procesu spalování dochází ke slučování uhlíku a vodíku s kyslíkem (O) ze vzduchu, čímž následně dochází k uvolnění tepelné energie za vzniku jiných chemických sloučenin. [2]



Obr. 1 Schéma přeměny energie u spalovacích motorů [1]

### 2.1.1. Historický vývoj spalovacího motoru

Éra spalovacích motorů se začala psát v období druhé poloviny 18. století, a to od roku 1769, kdy došlo Jamesem Watterem k sestrojení prvního samočinně pracujícího dvojčinného svislého vahadlového parního stroje. V této době bylo sice již představeno několik funkčních atmosférických, ohňových nebo parních strojů, ovšem k jejich provozu byla vyžadována obsluha na rozdíl od Wattova parního stroje. [3]

V průběhu 18. století byly spalovací motory využívány téměř výhradně jako staticky umístěné stroje k mechanizaci práce. Takto využívány byly například jako pohonné jednotky pro vodní pumpy čerpající přebytečnou vodu z hlubinných dolů. Teprve první polovina 19. století přinesla užití spalovacího motoru v dopravě. A to zejména díky Georgi Stephensonovi, kterému se podařilo sestrojít a úspěšně otestovat první parní lokomotivu a již v roce 1830 byl spuštěn pravidelný provoz na trati vedoucí z Liverpoolu do Manchesteru. Setkání s parními stroji inspirovalo i další vynálezce, a tak se vozidla, využívající parní pohon, objevují i v jiných zemích. [1]

Z kategorie silničních vozidel lze jmenovat například vynález Richarda Trevithicka. Jeho parní stroj tzv. „blafající ďábel“ byl úspěšně otestován v roce 1801 a v roce 1802 byl tento vysokotlaký stroj patentován. V roce 1804 bylo v USA Oliverem Evansem sestrojeno první parní samohybné vozidlo pohybující se nejen na souši, ale také na vodě. Na našem území byl v roce 1815 představen první parou poháněný automobil Josefem Božkem. V období první republiky bylo na našem území vyráběno parní nákladní vozidlo značky Škoda nazvané jako Škoda Sentinel. Toto vozidlo sloužilo v komunální dopravě hl. města Prahy ještě v padesátých letech minulého století. [1]

### 2.1.2. Historie vznětového motoru

O vznik vznětového motoru se zasloužil Rudolf Diesel, kterému byl roku 1892 udělen patent s názvem „*Způsob práce a druh provedení spalovacího motoru*“. Dieselův původní předpoklad byl, že jeho motor bude pracovat s účinností 70–80 % a s tlakem od 25 do 35 MPa. Tyto informace uvedl ve své knize *Teorie a konstrukce racionálního tepelného motoru* v roce 1893. Jeho první prototyp byl poháněn uhelným prachem. Dalším pokusem byl vodou chlazený motor, do kterého byl vstříkován benzín. Tyto pokusy ovšem nebyly příliš úspěšné, a proto začal používat lampový petrolej, při kterém byl chod motoru výrazně klidnější, ovšem s velkou spotřebou paliva. [1]

Brzy začíná pracovat na svém třetím prototypu s hlavním cílem snížit množství spotřebovávaného paliva. Po dokončení tohoto prototypu je Diesel s motorem spokojen a rok 1897 lze považovat rokem, kdy došlo ke vzniku vznětového motoru. Tento motor měl výkon 4,7 kW při 170 otáčkách za minutu a prokazoval vysokou ekonomičnost a účinnost cca 26 %. Vzhledem k rozměrům, hmotnosti a ke složitosti byly tyto motory využívány především jako motory stacionární nebo motory lodní. Teprve poté, co došlo k nahrazení kompresoru vstřikovacím čerpadlem, bylo možné dostatečně zmenšit jeho rozměry a hmotnost, což umožnilo jeho následné využití ve vozidlech. [1]

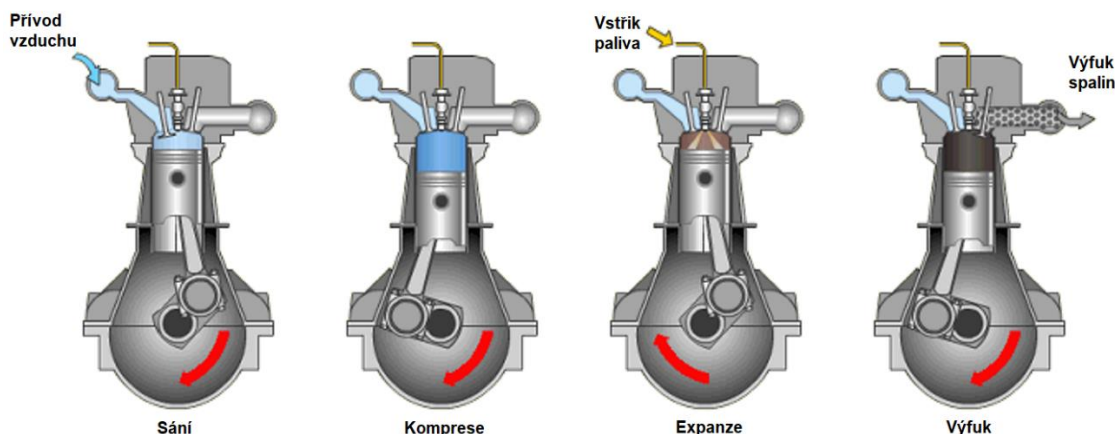
## **2.2. Vznětový motor**

Jako palivo současných vznětových motorů je používána především motorová nafta, která dosahuje vyšší výhřevnosti než obvykle používané palivo pro zážehové motory (benzín). Právě tento faktor se výrazně podílí na skutečnosti, že využití vznětových motorů je ekonomicky výhodnější, a to především v sektorech jako jsou nákladní a hromadná doprava.

Na rozdíl od zážehového motoru, kde je nutné k zapálení směsi využít elektrického výboje, pracuje vznětový motor s vyšším tlakem a teplotou, dostačujícími pro samovolné vznícení směsi. Vysoký tlak a teplota jsou zajištěny vysokým kompresním poměrem v rozsahu pohybujícím se od 14:1 do 22:1, na rozdíl od motorů zážehových, jejichž kompresní poměr bývá od 8:1 do 14:1. U současných zážehových motorů se nejčastěji setkáme s kompresním poměrem kolem 10:1. Díky dosažení vyšších tlaků dosahuje vznětový motor dle Carnotova cyklu lepší účinnosti než motor zážehový. Celková účinnost vznětového motoru se tak pohybuje v rozmezí od 30–45 %. [1] [4]

### **2.2.1. Základní princip fungování vznětového motoru**

Vznětové motory mohou být dvoudobé, nebo čtyřdobé. Dvoudobé motory mají ovšem v současné době poměrně malé využití (lodní doprava), a proto se budeme nadále zabývat výhradně motory čtyřdobými. Pracovní cyklus čtyřdobého vznětového motoru probíhá ve čtyřech zdvizích pístu ve spolupráci s ventilovým rozvodem, díky kterému je zajištěna správná výměna směsi ve válci. Jednotlivé fáze pracovního cyklu se nazývají: sání, komprese, expanze, výfuk viz obr. 2. Během jednotlivých fází dochází k pohybu pístu motoru mezi horní úvratí (HÚ) a dolní úvratí (DÚ). Vzdálenost mezi horní a dolní úvratí bývá označována jako zdvih. Čas, za který urazí píst tuto dráhu, označujeme jako takt. [4]

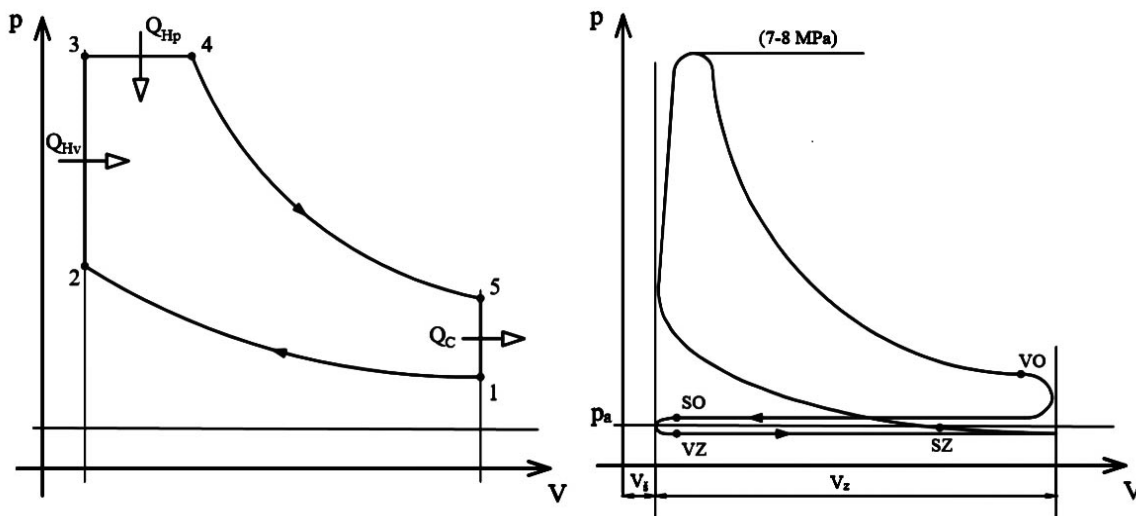


Obr. 2 Základní fáze čtyřdobého vznětového motoru [5]

V případě ideálního oběhu viz obr. 3 předchází samotné expanzi adiabatické stlačování čistého vzduchu. Vzduch je stlačován na tlak a teplotu natolik vysokou (700–1000 °C), aby teplota přesáhla zápalný bod tekutého paliva. Po ukončení komprese dochází k rozprášení směsi do žhavého vzduchu, přitom dochází ke vznícení paliva. Část vstříknutého paliva shoří naráz při stálém objemu, zbytek spalování probíhá za stálého tlaku. Vznikajícím teplem dochází k náhlé expanzi plynů. Tyto plyny působí na píst, kterému následně udělí kinetickou energii.

Popis porovnávacího diagramu Sabatova cyklu (vlevo)

- 1–2 Adiabatická komprese
- 2–3 Izochorický přívod tepla
- 3–4 Izobarický přívod tepla
- 4–5 Adiabatická expanze
- 5–1 Izochorický odvod tepla



Obr. 3 Porovnávací a indikátorový Sabatovův diagram vznětového motoru [6]

Pracovní oběh skutečného motoru se ovšem výrazně liší od oběhu motoru ideálního. Odchytky skutečného a ideálního motoru jsou zapříčiněny především těmito faktory:

- Válec neobsahuje pouze čistou náplň, ale také zbytky plynů z předchozího pracovního cyklu.
- Palivo neshoří dokonale, a to vlivem špatné směsi nebo také nedostatečnou teplotou stlačeného vzduchu, která není dostatečná k samovolnému vznícení paliva.
- Spalování neprobíhá při konstantním tlaku a konstantním objemu, jelikož směs hoří konečnou rychlostí.
- Mezi plyny a stěnami válce dochází k výměně tepla.
- V průběhu sání a výfuku vznikají ztráty z důvodu výměny náplně. Tato výměna se uskutečňuje změnami objemu, při které dochází ke spotřebě práce.

Mezi porovnávacím diagramem vznětového motoru a diagramem indikátorovým je možné si povšimnout výrazných odchylek, které vedou ke snížení výkonu u reálného motoru. V indikátorovém diagramu viz obr. 3 (vpravo) nacházíme tzv. smyčku střídavého plnění, která představuje ztrátu při sání a výfuku. Vytlačení výfukového plynu z válce totiž probíhá v porovnání s okolním barometrickým tlakem při malém přetlaku (u nepřepřlňovaných motorů). Namísto toho dochází k nasávání nové náplně do válce vůči barometrickému tlaku vlivem podtlaku. Vzniklá smyčka se projevuje jako negativní práce, která snižuje mechanickou účinnost motoru. Následkem přívodu a odvodu tepla je průběh kompresní křivky zpočátku strmější a potom plošší, než by odpovídalo adiabatickému ději. Taktéž křivka expanze je následkem odvodu tepla strmější než adiabatický průběh.

Tvar indikátorového diagramu u přeplňovaného čtyřdobého vznětového motoru je téměř totožný jako u motoru atmosférického. Liší se pouze v oblasti výměny náplně, kde tlak plnicího vzduchu je při sacím zdvihu vyšší než tlak spalín ve válci. Plocha smyčky střídavého plnění je, na rozdíl od atmosférických motorů, kladná. Tento rozdíl je způsoben principem přeplňování, jehož cílem je dopravit do válce větší hmotnost vzduchu. Díky tomu je možné dopravit do spalovacího prostoru více paliva, a tak při zachování stejného součinitele přebytku vzduchu dosáhnout zvýšení výkonu motoru. [2] [6]

## 2.2.2. Tepelná bilance

Tepelná bilance motoru vyjadřuje skutečnost, že z celkového množství tepla, které je dodáváno palivem, je pro užitečný výkon využita pouhá část. Některé z těchto tepelných ztrát, například ztráty chlazením, jsou ovšem pro spolehlivé fungování motoru nezbytné. Obecným cílem je snaha tyto ztráty maximálně minimalizovat a dosáhnout tak vyšší celkové účinnosti. Tepelnou bilanci je možné vyjádřit vztahem 1. Celkovou účinnost motoru lze určit vztahem 2. [1]

$$Q_p = Q_{ns} + Q_{ch} + Q_v + Q_s + Q_m + Q_e \quad (1)$$

$$\eta_e = \frac{Q_e}{Q_p} \quad (2)$$

Legenda:

$Q_p$  teplo přivedené palivem [ $\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$Q_{ns}$  teplo ztracené nedokonalým spálením paliva [ $\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$Q_{ch}$  teplo odvedené chlazením (chladicí kapalina, vzduch, olej) [ $\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$Q_v$  teplo odvedené výfukem [ $\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$Q_s$  teplo odvedené sáláním [ $\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$Q_m$  mechanické ztráty [ $\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$Q_e$  teplo efektivní (ekvivalent užitečného výkonu) [ $\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$\eta_e$  celková účinnost [%]

## 2.3. Přepřívání motorů

V současné době si lze povšimnout, že se většina automobilek nachází v jakémisi střetu zájmů. Z jedné strany je Evropskou unií kladen důraz na co nejnížší možné množství emisí produkovaných spalovacími motory. A na straně druhé jsou požadavky zákazníka, který očekává co možná nejvyšší výkon a nízkou spotřebu. Přepřívání je jedním ze hlavních způsobů, jak dosáhnout zmiňovaných požadavků a zároveň nepřilíš navýšit cenu vozidla. Na trhu se můžeme setkat i s jinými možnostmi, jak dosáhnout snížení emisí a zvýšení výkonu, ovšem jejich finanční náročnost nebývá příznivá. Z tohoto důvodu, a také díky nepřilíš složité zástavbě v rámci spalovacího prostoru, je přepřívání používáno u většiny v Evropě vyráběných vozidel. Jako výjimky lze uvést například automobilky Toyota nebo Mazda.

Samotné přeplňování funguje na principu „natlačení“ většího množství vzduchu do spalovacího prostoru, než je tomu v případě motorů atmosférických, a to z několika důvodů. Spalovací motor pracuje na principu přeměny energie tepelné na energii mechanickou. Množství získávané tepelné energie je dáno množstvím spáleného paliva, a to je závislé na množství vzduchu, který je nasáván do prostoru válce během sání. V případě atmosférických motorů je možné pracovat pouze s takovým množstvím vzduchu, který je nasáván podtlakem vlivem pístu pohybujícím se směrem k dolní úvrati. Právě toto množství vzduchu značně omezuje dávku paliva, která může být následně vstříknuta, aniž by došlo k výraznému snížení účinnosti a zvýšení emisí. V případě přeplňovaných motorů je, díky natlačení většího množství vzduchu do prostoru válce, možné dávkovat vyšší množství paliva, a to při zachování stejného objemu motoru a směšovacího poměru. [7]

Z předchozího odstavce lze odvodit, že díky přeplňování je možné zmenšit prostor zastavěný motorem tzv. downsizing, a to při zachování, nebo dokonce zvýšení výkonu. Pokud je využit přeplňovaný motor menšího objemu, díky menšímu objemu válce dochází ke snížení třecích a tepelných ztrát, momentu setrvačnosti, a tak ke zvýšení mechanické účinnosti související s úsporou paliva.

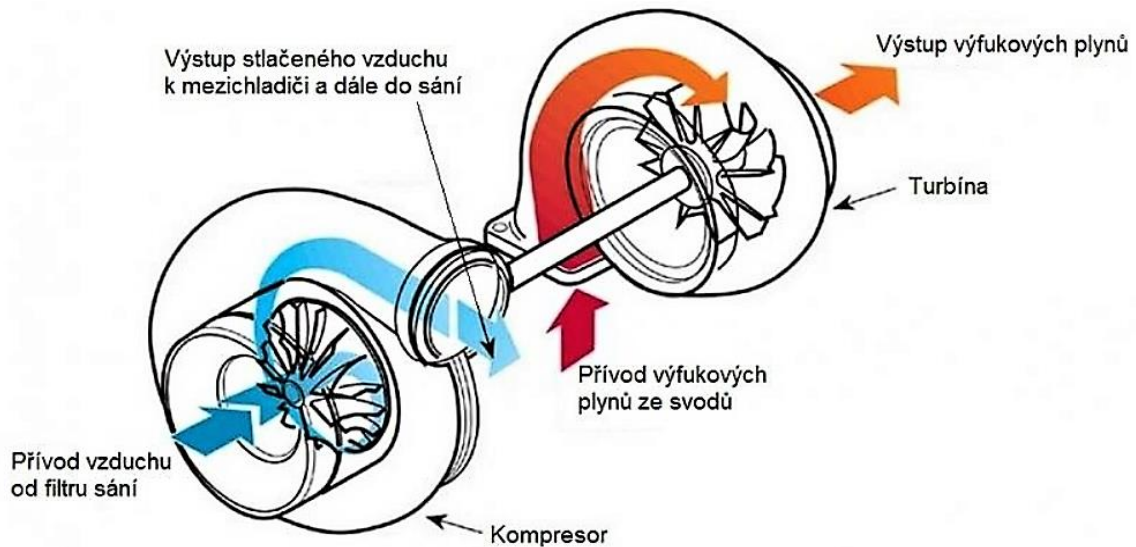
#### **Členění dle způsobu přeplňování:**

- Přeplňování turbodmychadly
- Přeplňování mechanicky poháněnými dmychadly
- Dynamickým plněním válců motoru
- Přeplňováním za pomoci tlakovzdušného výměníku

#### **Členění dle velikosti plnicího tlaku:**

- Nízkotlaké se součinitelem stlačení plnicího tlaku do 1,5 (zvýšení efektivního výkonu do 30 %).
- Středotlaké se součinitelem stlačení plnicího tlaku v rozmezí 1,6–2 (zvýšení efektivního výkonu motoru do 50 %).
- Vysokotlaké se součinitelem stlačení plnicího tlaku v rozmezí 2,1–3,5 (zvýšení efektivního výkonu do 100 %)
- Zvláště vysokotlaké se součinitelem stlačení plnicího tlaku v rozmezí 3,6–6 (zvýšení efektivního výkonu do 400 %) [1]





Obr. 4 Princip funkce turbodmyhadla [1]

### 2.3.1. Porovnání přeplňovaných a atmosférických vznětových motorů

Každá z mnoha možných úprav motorů s sebou nese množství kladných, ale také záporných vlastností a princip přeplňování není výjimkou. V některých případech ovšem není možné jednoznačně stanovit, zda se jedná o princip výhodný nebo nevýhodný.

Mezi výhody přeplňování lze jednoznačně zařadit již dříve zmiňovaný nárůst výkonu, při použití motoru se stejným zdvihovým objemem. Jako příklad je možné uvést například Škodu Octavii vyráběnou mezi lety 1997–2003, která byla vybavena atmosférickým vznětovým motorem 1.9 SDI (AQM) a dosahovala výkonu 50 kW při 4200 ot·min<sup>-1</sup> a točivým momentem 133 Nm při 2200 ot·min<sup>-1</sup>. Nicméně shodné vozidlo, které bylo vyráběno v letech 1997–2006 s využitím přeplňování, tedy motor 1.9 TDI (ASV) dosahovalo výkonu 81 kW při 4150 ot·min<sup>-1</sup> a točivým momentem 235 Nm při 1900 ot·min<sup>-1</sup>. Oba zmiňované motory jsou stejné konstrukce a liší se pouze úpravami, které souvisejí s přeplňováním pomocí turbodmyhadla. [8]

Jako další výhodu použití přeplňování lze uvést lepší optimalizaci průběhu točivého momentu. Díky použití turbodmyhadla s variabilní geometrií rozváděcích lopatek je možné dosáhnout rychlého nárůstu a celkově „plošší“ momentové charakteristiky, což sebou nese výhody jako jsou prudká akcelerace, snížení spotřeby paliva a dostatek točivého momentu i v nižších otáčkách. Konstantní hodnota točivého momentu je zajištěna natačením lopatek rozvaděče, kterými je regulován dodávaný plnicí tlak. [1]

Jednou z nevýhod přeplňovaných motorů mohou být zvětšené síly působící na klikový mechanismus. Chceme-li získat větší výkon motoru, je nutné zvýšit hodnotu středního efektivního tlaku působící na píst, s tím je spojeno celkové zvýšení sil působících v jednotlivých částech motoru. Z toho důvodu musí být, v rámci zachování životnosti, jednotlivé části konstrukčně přizpůsobeny tak, aby dokázaly odolat zvýšenému tlaku, teplotě a silám.

Dále je také nutné použít větší množství dílů zajišťujících správné fungování jako jsou: dmychadlo, upravené sání, u vyšších stupňů přeplňování použití mezichladiče (intercooler), ovládací prvky regulace plnicího tlaku (membránový ventil, obtokový ventil), atd. Taktéž je nutná úprava jednotlivých částí motoru, jako jsou mazací soustava, chladicí soustava, vzduchová soustava (extrémní náchylnost dmychadel na nečistoty).

Přeplňování s sebou nese taktéž nutnost použití olejů s únosností za velmi vysokých otáček a vysokou teplotní stabilitou. Velmi důležité je taktéž dbát na správné a dostatečné dochlazení dmychadla, zvláště po použití motoru ve vysokém zatížení, kdy je nutno zamezit nadměrnému tepelnému namáhání.

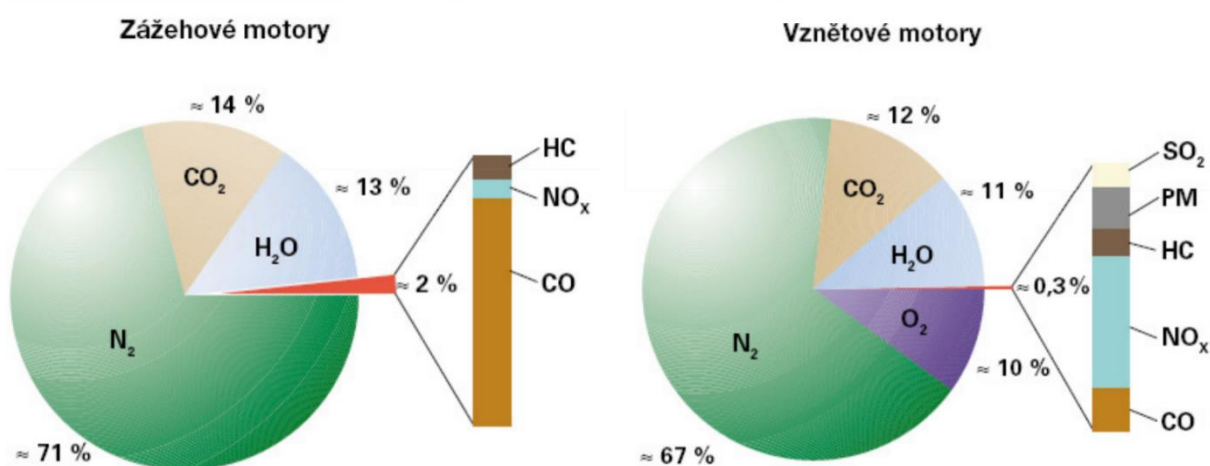
Většina zmiňovaných nevýhod s sebou nese i nárůst pořizovací ceny a provozních nákladů v porovnání s motory atmosférickými. [7]

## 2.4. Emise výfukových plynů

Během spalování uhlovodíkových paliv se vzduchem, dochází při dokonalé oxidaci ke vzniku oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) a vody ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Ovšem při nedokonalé oxidaci nalezneme další plyny, jako oxid uhelnatý ( $\text{CO}$ ) a vodík ( $\text{H}_2$ ). Kyslík (u zážehového motoru) nalezneme ve výfukových plynech jen v případě, byl-li v čerstvé směsi v přebytku, anebo nebyl využit z jiných důvodů. Naopak u vznětových motorů se vždy setkáme s přebytkem kyslíku ( $\text{O}_2$ ), protože tyto motory pracují s přebytkem vzduchu.

Jako jednu z nejvýznamnějších složek spalin lze považovat dusík ( $\text{N}_2$ ). Při hoření za vysokých teplot ve spalovacím prostoru dochází k oxidaci vzdušného dusíku za vzniku oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ). Tyto oxidy zastupuje zejména oxid dusnatý ( $\text{NO}$ ) a v menší míře také oxid dusičitý ( $\text{NO}_2$ ) a oxid dusný ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Za velmi nepříznivých podmínek oxidace vznikají nespálené uhlovodíky ( $\text{HC}$ ). U motorů s vnější tvorbou směsi se tato složka objevuje také jako součást spalin, a to z důvodu částečného úniku části čerstvé směsi do výfuku zkratovým vyplachováním.

Při výrazném nedostatku vzduchu (uvnitř kapičky kapalného paliva) dochází za vysokých teplot k dekompozici molekul uhlovodíků, jejichž následkem je vznik pevného uhlíku ve spalinách, a to především u vznětových motorů. Společně s výfukovými plyny odchází z motoru taktéž malé množství ostatních pevných částic. Jako například vysokomolekulové produkty tepelného poklesu mazacího oleje, popel, prach, částičky koroze a další. Některá uhlovodíková paliva obsahují síru, díky které během spalování dochází ke vzniku oxidů síry. Tyto oxidy se taktéž vyskytují ve spalinách. Přibližné složení výfukových plynů u zážehového a vznětového motoru je zobrazeno na obr. 5. [1]



Obr. 5 Složení výfukových plynů u zážehového a vznětového motoru [1]

### 2.4.1. Oxid uhelnatý

Plyn pro lidský organismus jedovatý. V kombinaci s krevním barvivem vytváří oxid uhelnatý velmi pevný karboxyhemoglobin, který výrazně omezuje přenos kyslíku mezi plícemi a krevním oběhem. Takto jsou jednotlivé orgány postupně poškozovány nedostatkem kyslíku, i v případě, že by byl vdechován do plic v dostatečném množství. Oxid uhelnatý se také významně podílí na vzniku takzvaného letního smogu. Celkové roční emise oxidu uhelnatého z antropogenních zdrojů, jsou řádově srovnatelné jako emise přírodní. [1]

### 2.4.2. Oxid uhličitý

Oxid uhličitý je plyn vznikající jako produkt dokonalé oxidace. Jeho přítomnost ve spalinách je výsledkem kvalitně spálené směsi paliva. Jedná se o velmi stabilní a málo reaktivní plyn, bez barvy a bez zápachu. Škodlivost tohoto plynu je pouze v takovém případě, pokud je jeho koncentrace natolik vysoká, že začne vytěsňovat vdechovaný kyslík. Oxid uhličitý patří mezi skleníkové plyny, které se podílejí na vzniku radiační clony omezující výměnu tepla země s okolím. Skleníkový efekt vede postupně ke zvyšování teploty a tím i k posunu klimatických

poměrů. Jako největším nebezpečím se jeví zrychlené tání ledovců a rychle zvyšující se hladina oceánů. Díky průmyslové činnosti dochází k postupnému zvýšení pozadí koncentrace oxidu uhličitého, i přes mnohé snahy o jeho snižování. V rámci antropogenních emisí obnáší podíl provozu spalovacích motorů přibližně 10 %. [1]

### **2.4.3. Oxidy dusíku**

Škodlivost oxidu dusnatého na živý organismus je vcelku nízká. Ovšem jeho přítomností v atmosféře dochází po určité době k jeho oxidaci na oxid dusičitý, u kterého je jeho škodlivost klasifikována jako závažnější. Během inhalace dochází na stěnách sliznice k tvorbě kyseliny dusičné ( $\text{HNO}_3$ ). Dýchací soustava reaguje na kyselinu dusičnou takovým způsobem, že začne automaticky přivírat přístup vdechovaného vzduchu do plic. Důsledkem toho je dušení a nutnost kašle. K tomuto nežádoucímu jevu dochází již při velmi nízkých koncentracích, tudíž i při velmi krátkých expozičních dobách. Oxidy dusíku se podílejí na vzniku (fotochemického) letního smogu. Výrazně se podílejí také na tvorbě kyselých dešťů. [1]

### **2.4.4. Oxidy síry**

Oxidy síry jsou produkovány z velké části vznětovými motory. Obsah síry v motorové naftě neustále klesá, z čehož vyplývá i snižující se emise plynoucí ze spalovacích motorů. Podíl emisí oxidů síry, vznikajících převážně ve vznětových motorech, je v současné době téměř zanedbatelný.

### **2.4.5. Nespálené uhlovodíky**

Jako nespálené uhlovodíky lze brát směsi různých skupin uhlovodíků, které vstupují jako palivo nebo vznikají při oxidaci v průběhu spalování. Uhlovodíky s nejmenší škodlivostí jsou nejčastěji původní skupiny uhlovodíkového paliva. Výrazně vyšší škodlivost mají uhlovodíky, které vznikají jako meziprodukt oxidace počáteční uhlovodíkové molekuly, u nichž vlivem různých okolností dochází jen k částečné oxidační reakci, a to například vlivem ochlazení u stěny válce. Tyto meziprodukty oxidačních reakcí se člení do skupiny karcinogenních látek a jejich škodlivost je velmi vysoká. Škodlivost těchto látek je především v jejich usazování na pevných částicích, které jsou následně vdechovány živými organismy. Nespálených nebo jen částečně zoxidovaných uhlovodíků je velké množství. Ovšem za nejvíce nebezpečné považujeme polycyklické aromatické uhlovodíky. Například benzpyren 3,4, jehož škodlivost je zesílena jeho vazbou na povrch emitovaných pevných částic. Z částečně zoxidovaných uhlovodíků lze zmínit například skupinu aldehydů R-CHO. Tato skupina vzniká v procesu před-oxidačních reakcí, jejichž existence je často spjata s provozem motoru v nižším

teplotním režimu. Tomu může být například při provozu s velkým přebytkem vzduchu, při provozu studeného motoru nebo při nízkém zatížení motoru. Nedokonale spálené, nebo také jen částečně zoxidované, uhlovodíky způsobují charakteristický zápach výfukových plynů. Tyto nespálené uhlovodíky působí na organismus škodlivě, a to především na sliznice. Taktéž vedou k poruchám podmíněných reflexů a k poškození dýchacích cest.

#### **2.4.6. Pevné částice**

Pevné částice vznikají především u motorů vznětových a je v nich obsažen primární uhlík, organický uhlík a malé množství sulfátu, vody a dusíku. Obsah primárního uhlíku je přibližně 75 %. Ovšem složení je výrazně závislé na typu motoru a jeho dodatečných zařízeních, což může být například filtr pevných částic (DPF). Jádro pevných částic je složeno z pevného uhlíku a popele. Sulfátové a organické směsi jsou sorbované na povrchu jádra během koagulace, kondenzace částic a adsorpce. Jejich expozice v krátkém čase může způsobit podráždění jícnu, oka, průdušek. Taktéž ale neurofyziologické symptomy jako jsou zvracení a dýchací problémy. Dlouhodobá expozice může vyvolat zánět a histopatologické změny v plicích. Odhad koncentrace, která nevyvolává žádný karcinogenní efekt, je  $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^3$ . Pevné částice se mohou v ovzduší nacházet v různých velikostech. K odstranění velkých částic dojde například polknutím nebo jsou zachyceny v horních cestách dýchacích. Menší částice mohou dosáhnout až k povrchu plic. Tyto částice mohou být odstraněny během čištění plicních sklípků, ale mohou být taktéž unášeny až do krve. Nejmenší částice hrají důležitou roli v toxicitě okolních částic. [1]

### **2.5. Zařízení pro úpravu a eliminaci výfukových plynů**

Splnění přísných emisních limitů pro vznětové motory je v současné době základním kritériem. Splnění těchto limitů je možné zajistit nejenom samotnou konstrukcí motoru a způsobem vstřikování paliva, ale také za pomoci zařízení mimo spalovací prostor sloužících k dodatečné redukci emisí.

#### **2.5.1. Recirkulace výfukových plynů (EGR)**

U vznětových motorů je možné pro snížení emisí  $\text{NO}_x$  využít EGR (Exhaust Gas Recirculation), jehož hlavním úkolem je snížení špičkových teplot během spalování a také snížení množství přiváděného kyslíku. Toho je dosaženo přivedením části výfukových plynů do spalovacího prostoru. Při nízkém zatížení motoru je možné recirkulovat relativně vysoké

procento výfukových plynů, ovšem s rostoucím množstvím recirkulovaného plynu vzrůstá kouřivost motoru. Poloha otevření EGR ventilu může dosahovat hodnot až 40 %. [9]

### **2.5.2. Oxidační katalyzátor (DOC)**

Za pomoci oxidačního katalyzátoru je možné snižovat koncentraci nedokonalých produktů spalování ve výfukových plynech. Tělo DOC je tvořeno nerezovým obalem, v němž se nachází katalyzátorový nosič (kovový nebo keramický), na kterém je nanášena tenká aktivní katalytická vrstva. Redukční katalytická vrstva je tvořena rhodiem, oxidační platinou a jejich provozní teplota je od 400 do 800 °C. Během těchto provozních teplot dochází k oxidaci CO a nespálených uhlovodíků na CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O a redukci NO<sub>x</sub> na N<sub>2</sub> a O<sub>2</sub>. Snížení emisí CO a HC je s použitím DOC možné až o 90 %. [9]

### **2.5.3. Filtr pevných částic (DPF)**

Filtry pevných částic DPF (Diesel Particulate Filter) bývají velmi často umístěny ve stejném tělese jako oxidační katalyzátor. Jedná se o zařízení odstraňující velmi jemné karcinogenní částice, které jsou obsaženy ve výfukových plynech vznětového motoru. Systém funguje na principu zachytávání pevných částic na porézním materiálu poloprůchodných kanálků filtru, což způsobuje jeho postupné ucpávání a je tak nutná jeho výměna nebo čištění. Filtr je čištěn aktivním nebo pasivním regenerativním spalováním zachycených sazí na CO<sub>2</sub>. [9]

### **2.5.4. Selektivní katalytická redukce (SCR)**

SCR (Selective Catalytic Reduction) slouží ke snižování emisí NO<sub>x</sub> obsažených ve výfukových plynech vznětového motoru. S využitím SCR lze motor provozovat i v oblastech s vyšší produkcí NO<sub>x</sub>, ovšem zároveň také menším množstvím pevných částic a HC. Snižování obsahu těchto látek (především NO<sub>x</sub>) je dosahováno vstřikováním kapaliny (NH<sub>3</sub> 32,5 % a demineralizovaná H<sub>2</sub>O) obchodního názvu AdBlue (vodní roztok syntetické močoviny) do výfuku, čímž se většina NO<sub>x</sub> za přítomnosti chemického katalyzátoru a dostatečné teploty redukuje na H<sub>2</sub>O a N<sub>2</sub>. Při poruše systému nebo nedostatku AdBlue motor funguje dál se zvýšenou emisní stopou. U většiny vozidel v tomto okamžiku zasáhne OBD (On Board Diagnostik) řídicí jednotka a omezí výkon motoru tak, aby donutila řidiče doplnit AdBlue nebo nechat opravit systém. S využitím SCR lze dosáhnout snížení NO<sub>x</sub> ve spalinách o více než 80 % a snížení emisí pevných částic o více než 30 %. [9]

## 2.6. Motorová nafta

Motorová nafta označovaná taktéž jako diesel patří mezi nejdůležitější produkty ropných rafinerií. Jedná se o nejvyužívanější palivo vznětových motorů, které je tvořeno směsí kapalných uhlovodíků (n-alkanů, isoalkanů, alkenů, naftalenu, aromátů) s 10 až 22 atomy uhlíku vroucích v rozmezí od 150 až 370 °C. Z hlediska výroby se jedná o střední ropné destiláty. Motorová nafta je získávána destilací a dalšími navazujícími technologickými procesy, kterými jsou: hydrogenační rafinace, hydrokrakování, katalytické krakování a další. Aby byla tato směs vhodná a použitelná jako motorové palivo, je nutné, aby bylo splněno množství kvalitativních ukazatelů, které jsou předmětem pečlivé výstupní kontroly výrobců. Tyto základní kvalitativní parametry pro motorovou naftu jsou dány normou ČSN EN 590+A1. [10]

V současné době, s ohledem na rozsah využití, je motorová nafta stále nejvýznamnějším motorovým palivem v hospodářsky vyspělých zemích. Zpřísnování emisních limitů a zavedení řady emisních předpisů limitujících obsah nespálených uhlovodíků, pevných částic, oxidu uhelnatého, oxidu siřičitého a oxidu dusíku, nutí výrobce k vývoji motorů s dokonalejším spalováním a k maximálnímu snížení produkovaných škodlivých emisí.

### 2.6.1. Výroba motorové nafty

Při výrobě motorové nafty dochází k mísení dvou základních složek, kterými jsou petrolej (s destilačním rozmezím od 160 do 260 °C) a plynový olej (s destilačním rozmezím od 250 do 360 °C). Obě zmiňované frakce ovšem obsahují velké množství sirnatých sloučenin (v případě plynového oleje podstatně více). Z tohoto důvodu musí být podrobeny hydrogenačnímu odsíření, při kterém zároveň dochází také k odstranění stopového množství kyslíku a dusíku. Podmínky hydrogenace ovšem musí být mírné, aby nedocházelo ke štěpení molekul a ke vzniku n-alkanů, tj. parafinické uhlovodíky o vysokém bodu tuhnutí. [11]

Hydrogenační odsířování je relativně dlouho používanou technologií, ovšem požadavky na výrobu tzv. bezsirnate nafty, tedy nafty obsahující do 10 ppm, tento technologický proces značně komplikují. Takto hluboké odsíření nejsou schopny dosavadní hydrogenační jednotky dosáhnout a je nutná jejich rozsáhlá úprava nebo výstavba nových jednotek. Některé z výrobních procesů jsou vedeny ve dvou stupních, jelikož katalyzátory určené pro úplné odsíření vyžadují, aby vstupní surovina obsahovala jen velmi malé množství síry, respektive jejich sloučenin. [11]

Jedna z vlastností petroleje je velmi nízký bod tuhnutí, a to méně než  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V případě plynového oleje se nachází bod tuhnutí kolem  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  nebo i vyšší. Z tohoto důvodu je letní druh nafty tvořen především plynovým olejem s bodem tuhnutí pohybujícím se okolo  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Naopak zimní druh nafty musí obsahovat velké množství petrolejové frakce. Motorovou naftu není možné z ekonomických důvodů odparafínovávat jako mazací oleje za pomoci procesu používajícím chlazení. Je ovšem možné použití procesu hydroizomerace, a díky tomu dosáhnout částečného převedení n-alkanů s vysokým bodem tuhnutí na tekuté izoalkany vhodné do nižších teplot. [11]

## 2.6.2. Základní vlastnosti motorové nafty

### Cetanové číslo

Jednou ze základních a velmi důležitých vlastností motorové nafty je cetanové číslo, které je dáno především délkou uhlovodíkového řetězce. Z tohoto důvodu mají nejvyšší cetanové číslo n-alkany (parafíny) a naopak nejnižší aromáty. Cetanové číslo vyjadřuje schopnost motorové nafty odolávat samovznícení. Čím je hodnota cetanového čísla vyšší, tím je nižší doba zpoždění zážehu. Projevem vysokého cetanového čísla je rovnoměrné spalování nafty s hladkým chodem motoru. Na emise vznětového motoru má ovšem hodnota cetanového čísla jen velmi malý vliv a projevuje se pouze při studených startech (neprohoření celé dávky paliva zapříčiňuje zvýšené emise CO a HC). V případě starých pomaluběžných vznětových motorů nebylo cetanové číslo natolik důležité jako v současné době u moderních rychloběžných motorů, kdy se požadavky na cetanové číslo s novými emisními normami zvyšují. Výkon motoru nedosahuje vyšších hodnot se zvyšujícím se cetanovým číslem spalované motorové nafty. [12]

Hodnota cetanového čísla se stanoví dle zkušebního motoru, u kterého je možné nastavit různé kompresní poměry. Při předepsaných laboratorních podmínkách je zjišťována hodnota minimálního kompresního poměru, u kterého dochází k výpadkům vznícení směsi. Výsledná hodnota je porovnána s výsledky čistého cetanu (n-hexadekanu), jehož cetanové číslo je 100 a taktéž s methylnaftalenem, jehož cetanové číslo je 0. Dle procentuálního zastoupení cetanu ve zkoumaném palivu je možné stanovit hodnotu cetanového čísla. Cetanové číslo je možné taktéž stanovit z přepočtu cetanového indexu, který je možné vypočítat z výsledků laboratorního měření destilace a hustoty. Minimální hodnota cetanového čísla motorové nafty pro studené starty je 40. Pro snadné studené starty je vhodné cetanové číslo 50 a výše. [13] [12]



## Hustota

Hustota motorové nafty úzce souvisí s cetanovým číslem. Zpravidla motorové nafty s nižším cetanovým číslem mají vyšší hustotu a také vyšší výhřevnost, která je dána zejména typem uhlovodíků. Hustota motorové nafty je dána především obsahem aromátů a dle normy se může pohybovat od 800 do 845 kg·m<sup>-3</sup> při 15 °C. Z hustoty je možné odhadnout přibližné složení motorové nafty, tedy jaké složky v ní převládají. V případě vysoké hustoty se může jednat o znečištění výševroucími složkami, kterými mohou být například topné oleje. Naopak u motorové nafty s nízkou hustotou lze předpokládat znečištění nízkovroucími složkami, například benzinem. Hustotu paliva je možné měřit ponornými hustoměry nebo elektronicky. [12]

Hustota paliva taktéž souvisí s výkonem motoru, jelikož palivová čerpadla pracují objemově. Se zvyšující se hustotou paliva dochází k naplnění válce vyšším hmotnostním množstvím a k poklesu měrné spotřeby paliva. Hustota motorové nafty může mít ovšem vliv i na poškození motoru, a to například u nafty s nízkou viskozitou, kde dochází ke snížení mazivosti. Pohybové části palivové soustavy jsou tak rychleji opotřebovávány. Dále má také hustota vliv na cetanové číslo a emise. U motorové nafty s vysokou viskozitou dochází ve spalovacím prostoru ke zhoršenému rozprášení, následkem čehož nafta neodhořívá správně (spálení pouze povrchu kapičky). Toto zhoršené spalování má za následek vyšší emise nespálených uhlovodíků, pevných částic a oxidu uhelnatého. [12]

## Bod vzplanutí

Jedním z dalších významných vlastností motorové nafty je bod vzplanutí, jehož hodnota se pohybuje mezi 58 a 75 °C, a tudíž je motorová nafta řazena do kategorie hořlavin 3. třídy. Oproti tomu benzín má bod vzplanutí hluboko pod 0 °C, z tohoto důvodu i velmi malé množství benzínu obsažené v motorové naftě, výrazným způsobem snižuje její bod vzplanutí a stává se tak hořlavinou spadající do kategorie 2. nebo také 1. třídy. Zimní motorové nafty mívají bod vzplanutí nižší než letní. [12]

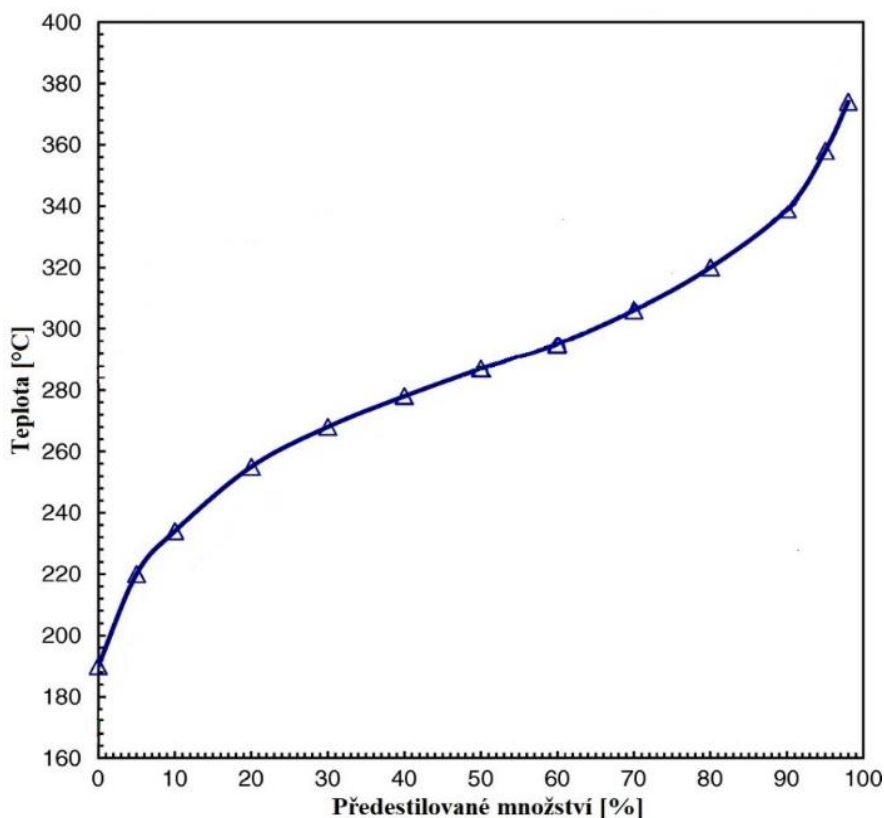
## Obsah síry

Maximální obsah síry obsažený v motorové naftě je dán normou ČSN EN 590+A1 a je stanoven na 10 mg·kg<sup>-1</sup>. Tyto motorové nafty byl v minulosti označovány jako bezsírnaté nebo také jako SF (Solhpur Free). Obsažená síra v palivu zapříčiňuje korozi, poškozuje katalyzátory a dále také negativně ovlivňuje emise (tvorba síranového jádra). Snižování množství síry v motorové naftě má ovšem za následek i výrazné snížení mazací schopnosti nafty a musí tak být upravována přidáním aditiv. [13] [12]

### 2.6.3. Destilační křivka motorové nafty

Destilační křivka motorové nafty viz obr. 6 je jednou z nejdůležitějších metod posouzení jejích jakostních vlastností. Průběh této křivky vede k přibližnému odhadu složení a taktéž k určení převládajících složek v motorové naftě.

Počáteční bod destilace není pevně stanoven a je řízen dle požadavku na hodnotu bodu vzplanutí. Při padesátiprocentním bodu T50, který bývá označován jako „teplota středního bodu varu“, dojde k predestilování 50 % motorové nafty. V případě letních motorových naft se teplota padesátiprocentního bodu pohybuje v rozmezí od 275 do 290 °C, neměla by ovšem přesáhnout 300 °C. Přesáhnutí této teploty by indikovalo vysoký obsah výševroucích těžších složek obsažených v palivu. Při konci destilační křivky T95 (predestilováno 95 % motorové nafty) by teplota neměla přesáhnout 370 °C. [12]



Obr. 6 Destilační křivka motorové nafty [14]

Čím vyšší podíl níževroucích složek motorová nafta obsahuje, tím lépe dochází k jejímu rozprášení ve spalovacím prostoru a k jejímu následnému spálení. Nadměrně vysoký obsah těchto látek ovšem vede k příliš rychlému vypařování ve spalovacím prostoru a způsobuje tak nepravidelný chod motoru. Výševroucí složky nafty se podílejí na chlazení stěn válců, pomalu a postupně se odpařují a mažou pohybové části palivového systému, na kterých vytváří mazací

film. Naopak v případě, kdy motorová nafta obsahuje příliš vysoký podíl výševroucích složek, dochází ke zhoršenému odpařování paliva. Rozptýlené kapičky motorové nafty následně ohoří pouze na povrchu, což vede k nárůstu produkce pevných částic. Tyto nafty mají vyšší sklony k tvorbě karbonizačním zbytkům. Maximální množství karbonizačního zbytku je dáno normou a činí 0,3 % na 10 % destilačního zbytku. [12]

Vysoká produkce pevných částic se taktéž projevuje na kvalitě motorového oleje, který vlivem zvýšeného množství karbonu rychleji degraduje a výrazně zvyšuje abrazivní opotřebení zejména částí pístní skupiny a válců. Zvýšenou tendenci k tvorbě karbonu mají motorové nafty s vysokým obsahem aromátů a olefinů. [12]

#### **2.6.4. Požadavky a druhy motorové nafty dle ČSN EN 590+A1**

Jednotlivé vlastnosti motorové nafty jsou dány normou ČSN EN 590+A1. Dle této normy je dovoleno přidávání barviv a značkovacích látek. Dále je také možné přidávat látky navyšující výkon, přičemž je doporučeno použití přípravků, které nemají vedlejší škodlivé účinky a nedochází tak ke zhoršení jízdních vlastností a regulaci emisí. [13]

V případě, že motorová nafta obsahuje trikarbonyl(methylcyklopentadienyl)mangan (MMT), je nutné, aby byl výdejní stojan označen štítkem (v národním jazyce) oznamujícím obsah kovových přísad dle normy EN 16942. Obsah MMT musí být v souladu s normou ČSN EN 590+A1. [13]

Motorová nafta může dále obsahovat do 7 % objemového množství FAME (Fatty Acid Methyl Ester), tento podíl je taktéž podmíněn požadavky závislých na klimatických podmínkách. Aditiva zlepšující tekutost v motorové naftě obsahující FAME musí být plně kompatibilní s motorovou naftou. V případě skladování FAME je důrazně doporučeno přidání aditiv zvyšujících oxidační stabilitu, a to již v průběhu výroby. Přidaná aditiva však mohou podporovat tvorbu úsad, a proto je nutné tato aditiva vybírat opatrně, zvláště u motorové nafty pro arktické klima. [13]

Tab. 1 Obecné požadavky na motorovou naftu dle normy ČSN EN 590+A1 (65 6506); zdroj dat: [15]

Vlastnost	Jednotka	Mezní hodnoty	
		min.	max.
Cetanové číslo		51	—
Cetanový index		46	—
Hustota při 15 °C	kg/m <sup>3</sup>	820	845
Polycyklické aromatické uhlovodíky	% (m/m)	—	8
Obsah síry	mg/kg	—	10
Obsah manganu	mg/l	—	2
Bod vzplanutí	°C	nad 55	—
Karbonizační zbytek (na 10 % destilačního zbytku)	% (m/m)	—	0,3
Obsah popela	% (m/m)	—	0,01
Obsah vody	% (m/m)	—	0,02
Celkový obsah nečistot	mg/kg	—	24
Korozivní působení na měď (3 h při 50 °C)	stupeň koroze	třída 1	
Obsah methylesterů mastných kyselin (FAME)	% (V/V)	—	7
Oxidační stabilita	g/m <sup>3</sup>	—	25
	h	20	—
Mazivost, průměr otěrové plochy při 60 °C	μm	—	460
Viskozita při 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	2	4,5
Destilační zkouška			
při 250 °C predestiluje	% (V/V)		<65
při 350 °C predestiluje	% (V/V)	85	
95 % (V/V) predestiluje při	°C		360

### 2.6.5. Druhy motorových naft dle nízkoteplotních vlastností

Jednou z velmi důležitých vlastností motorové nafty je její chování za nízkých teplot. Ve většině států Evropské unie je v průběhu roku distribuována motorová nafta s odlišnými nízkoteplotními vlastnostmi, a to v závislosti na ročním období. Tyto nafty jsou dle normy ČSN EN 590+A1 členěny podle jejich chladových parametrů označovaných jako CFPP (Cold Filter Plugging Point). Tento teplotní bod stanovuje okamžik, při kterém je ještě motorová nafta schopná pronikat palivovým filtrem a nedochází k jeho zanesení vrstvou vyloučených parafinů.

#### Letní motorová nafta

Motorová nafta určena pro mírné klimatické podmínky třídy B s CFPP nižší než 0 °C. Určeno k prodeji v období od 15. 4. do 30. 9.

#### Přechodová motorová nafta

Motorová nafta určena pro mírné klimatické podmínky třídy D s CFPP nižší než -10 °C. Určeno k prodeji v období od 1. 3. do 14. 4 a taktéž v období od 1. 10. do 15. 11.

## Zimní motorová nafta

Motorová nafta určena pro mírné klimatické podmínky třídy F CFFP nižší než  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Určeno k prodeji v období od 16. 11 do 28. 2.

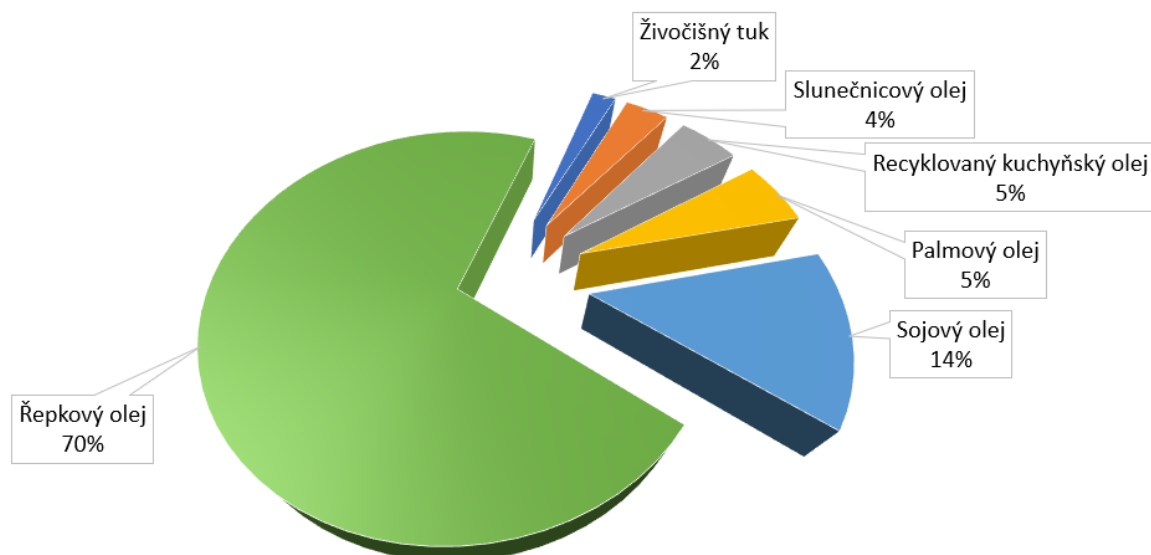
Výše uvedené druhy motorové nafty jsou prodávány na čerpacích stanicích ze shodného výdejního stojanu a neliší se označením. Aby byl zajištěn bezporuchový provoz motorů i v případě silných mrazů, je vyráběna arktická motorová nafta jejíž CFFP je nižší než  $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Za nepříznivých teplotních podmínek se lze setkat s motorovou naftou, která není zcela čirá. Toto zakalení je způsobeno částečným vznikem krystalů parafínu, které jsou ovšem natolik malé, že neohrozí průchod paliva palivovým systémem. [10]

## 2.7. Bionafta

Pod pojmem „bionafta“ bývá standardně označováno motorové palivo vyrobené na bázi methylesterů vyšších mastných kyselin z biomasy. Taktéž se ovšem lze setkat s označením FAME (Fatty Acid Methyl Ester) nebo také „biodiesel“.

Na území České republiky je nejvíce využívaným druhem bionafty methylester řepkového oleje (MEŘO). Z důvodu příznivých klimatických podmínek pro pěstování řepky olejky a jejího obsahu oleje v semenech (40–50 %), je v Evropě bionafta vyráběna především lisováním a rafinací řepkového oleje. Namísto toho podíl vyrobené bionafty z odpadních živočišných tuků nebo lojů (AFME – animal fats methylesters) činí pouze kolem 2 % viz obr. 7. Ekonomika výroby bionafty je ovšem závislá především na ceně olejů a tuků, jelikož tyto náklady tvoří více než 80 %. Z tohoto důvodu se výrobci bionafty snaží využít i levnější surovinové zdroje, a to tedy nejedlé či odpadní tuky. [16]

Hlavní výhodou použití methyl esteru řepkového oleje, jako paliva pro vznětové motory, je především jeho relativně vysoká výhřevnost, a to přibližně  $40\text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . [16] [17]



Obr. 7 Procentuální zastoupení olejů a tuků využívaných pro výrobu bionafty v Evropě; data: [16]

### 2.7.1. Výroba MEŘO

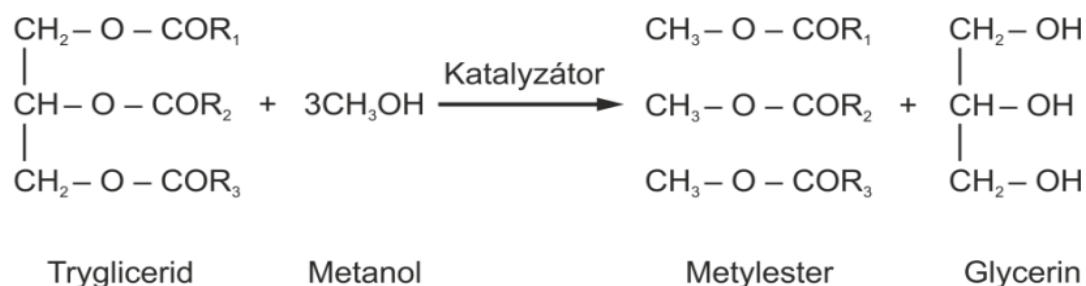
Methylester řepkového oleje je čirá nažloutlá kapalina netoxické povahy neobsahující těžké kovy nebo látky škodlivé zdraví, neomezeně mísitelná s motorovou naftou. Jedná se o látku agresivní vůči běžným nátěrům a pryžím. Základními vstupními surovinami pro výrobu jsou řepkový olej a menší množství metanolu. Celý výrobní proces se skládá z lisování oleje, filtrování, reakce oleje a metanolu za pomoci katalyzátoru a následný vznik metylesteru a glycerinu (esterifikace). [18]

#### Lisování oleje

Olej ze semen řepky olejné se získává převážně lisováním tzv. „zastudena“, tedy bez předchozího zahřátí řepkových semen. Vedlejším produktem zmíněného lisování jsou řepkové výlisky, jež obsahují zbytkový olej (12–16 % hm.). Ty jsou následně využívány v suché podobě jako dobře skladovatelná a na bílkoviny bohatá část krmných směsí. V případě velkých průmyslových lisoven jsou využívány zařízení pro extrakci, zbytkové výlisky pak obsahují pouze do 2 % hm. zbytkového oleje. Řepkový olej získávaný za pomoci extrakce (použití hexanu) ovšem zpravidla obsahuje vysoký podíl fosforu, který je nutný před dalším zpracováním odstranit. Další alternativou získávání oleje ze semen řepky olejky je pomocí organických rozpouštědel. V případě této metody je možné dosáhnout velmi vysoké výtěžnosti oleje, ale zbytkové výlisky není možné dále využít pro výrobu krmiv. [17]

## Reesterifikace

V průběhu chemické reakce dochází ke vzniku methylesteru řepkového oleje a současně vzniká jako vedlejší produkt surový glycerin. Jedná se o chemickou reakci s metanolem za přítomnosti 30 alkalických hydroxidů NaOH, KOH jako katalyzátorů, která v závislosti na použité technologii probíhá za běžné, nebo za zvýšené teploty. Během reesterifikace dochází k uvolňování acylových zbytků z triglyceridu, které se následně váží na metanol. Vedle vznikajícího methylesteru mastné kyseliny tak dochází zpočátku ke vzniku diglyceridu a monoglyceridu, až se uvolní glycerin, který se, díky své omezené rozpustnosti v tucích a methylesterech, oddělí z reakční směsi jako spodní, tedy těžší fáze. Získaný methylester řepkového oleje se izoluje od glycerinu, který je vedlejším produktem. Surový glycerin se následně rafinuje a je žádaným produktem pro další využití v chemickém průmyslu. Reesterifikace řepkového oleje probíhá následujícím způsobem viz obr. 8. Získaný methylester je v praxi označován jako MEŘO. Cílem reesterifikace je získání kvalitního paliva, které se co nejvíce podobá svými fyzikálními a chemickými a palivářskými vlastnostmi standardní ropné motorové naftě splňující normu EN 590+A1. [17] [19]



Obr. 8 Reesterifikace řepkového oleje [20]

### 2.7.2. Výhody a nevýhody použití MEŘO

#### Výhody

- Biologicky rozložitelné palivo.
- Vysoká mazací schopnost, která se podílí na opotřebení motoru a prodlužuje životnost vstříkovacích jednotek. Zvláště důležité pro rotačního vstříkovacího čerpadla.
- Oproti ropné naftě snížená kouřivost o 50 %.
- Lepší hoření ve spalovacím motoru snižuje kouřivost, množství pevných částic, aromatických látek, síry, a uhlovodíků.
- Alternativní palivo velmi podobné motorové naftě. [17]

## Nevýhody

- Omezená možnost výroby (20 % celkové spotřeby paliva) uvažujeme-li ornou plochu pro produkci řepky.
- Menší výhřevnost má za následek zvýšení spotřeby paliva přibližně o 7,5–8 %.
- Negativní vliv na motorový olej tzv. „želatinace oleje“.
- Vadnutí výkonu motoru a nutnost dekarbonizace.
- Agrese vůči laku a plastům.
- Ve srovnání s ropnou motorovou naftou snížení výkonu o 2,5–5 % v celém rozsahu otáček. [17]

## 2.8. Motorová paliva vyráběná hydrogenací rostlinných olejů a živočišných tuků

Rostlinné oleje v současné době představují hlavní surovinu pro výrobu biopaliv, která jsou využívána jako alternativní palivo k motorové naftě. Jako příklad o možné náhradě ropných paliv lze uvést, že celosvětová roční těžba ropy představuje více než 4000 Mt, zatímco celosvětová produkce rostlinných olejů činí přibližně 200 Mt. Ze zmíněné produkce rostlinných olejů na výrobu bionafty připadá pouze necelých 30 Mt. V čisté podobě našly rostlinné oleje jako palivo určené pro vznětové motory jen okrajové uplatnění. Namísto toho ve formě bionafty jsou v současné době dominantním biopalivem využívaným pro pohon vznětových motorů. Bionaftou (FAME nebo také biodiesel) jsou ovšem označovány směsi methylesterů mastných kyselin vyráběných transesterifikací rostlinných olejů nebo živočišných tuků za pomoci methanolu. Chemická podstata bionafty je tedy tvořena methylestery mastných kyselin, namísto toho motorová nafta vyrobená z ropy je tvořena směsí uhlovodíků. [21]

V České republice se můžeme relativně často setkat s ne zcela správným použitím termínu bionafta jako synonyma zkratky MEŘO (metylestery řepkového oleje). Bionafta má oproti běžné motorové naftě vyráběné z ropy řadu nevýhod vyplývajících z její chemické povahy. Nižší výhřevnost bionafty je přitom nedostatkem pouze minoritním, vedle agresivního působení bionafty na některé typy elastomerů a riziko hydrolyzy v přítomnosti vody. V případě hydrolyzy dochází ke vzniku volných mastných kyselin, které zapříčiňují korozi kovových materiálů. Voda ovšem rovněž zvyšuje riziko mikrobiálního napadení, vůči kterému je bionafta výrazně méně rezistentní než palivo vyrobené z ropy. Jako nejproblematictější vlastnost bionafty lze zmínit její nízkou oxidační stabilitu, která je způsobena přítomností dvojných



vazeb v řetězcích nenasycených mastných kyselin vázaných v molekulách FAME. V případě oxidace bionafty jsou výslednými produkty nejenom látky s nižší molekulovou hmotností než v případě původní molekuly bionafty (alkoholy, aldehydy, karboxylové kyseliny), ale také látky s vyšší molekulovou hmotností. Tyto nerozpustné vysokomolekulární látky vytvářejí pryskyřičnaté úsady, které jsou schopny částečně nebo zcela ucpat jednotlivé části palivového systému, kterými mohou být například vstřikovače nebo palivový filtr. Taktéž dochází k vytváření nerozpustných úsad na horkých površích motorů. Vzniklé oxidační produkty bionafty v menší či větší míře vždy pronikají do klikové skříně motoru a mohou zapříčinit rychlé znehodnocení motorového oleje. [21]

I přes zmíněné nedostatky je bionafta v současné době jedním z nejčastěji používaným alternativním dieselovým palivem. Kvalita tohoto paliva je v EU předepsána normovanou specifikací EN 14214 [22]. Čistou bionaftu je možné spalovat běžnými vznětovými motory, ovšem většina automobilových výrobců toto alternativní palivo oficiálně neschvaluje. Na trhu se lze setkat nejen s čistou bionaftou, ale také s prodejem směsného paliva, které obsahuje ropnou motorovou naftu a FAME. V České republice s palivem obsahujícím 30 obj. % bionafty (B30), které je označováno jako směsná motorová nafta (SMN30). Zřejmě největší význam co do objemu spotřeby, má její plošný přídavek do ropné motorové nafty. Motorová nafta může obsahovat až 7 obj. % FAME a díky celoevropskému plánu využití biopaliv v dopravě je této možnosti plně využíváno. [19] V České republice je podle zákona č. 180/2007 Sb., o ochraně ovzduší stanoven minimální podíl biopaliva ve směsi s ropnou motorovou naftou na 6 obj. % z celkového objemu prodané nafty. Většina motorové nafty, která je prodána na území ČR, tedy obsahuje bionaftu již v zmíněném množství. [21]

Dříve zmiňovaná rizika použití bionafty jsou minimalizována na přijatelnou úroveň jejím nízkým obsahem v motorové naftě. I přes tento fakt je ovšem nutné k tomuto palivu přistupovat odlišným způsobem, než je tomu u běžné motorové nafty. Příkladem může být dlouhodobé skladování nafty, kdy tato nafta nesmí obsahovat FAME. Stejně tak v případě nafty používané u záložních dieselagregátů nesmí být použita nafta obsahující FAME.

Výrazně kvalitnějšího paliva určeného pro vznětové motory, než je klasická bionafta, může být dosaženo pomocí hydrogenace rostlinných olejů. Jedná se o perspektivní dieselové biopalivo, přičemž jeho vlastnosti jsou v mnoha ohledech srovnatelné nebo lepší, než je tomu u čisté motorové nafty. [21]

### 2.8.1. Hydrogenace rostlinných olejů

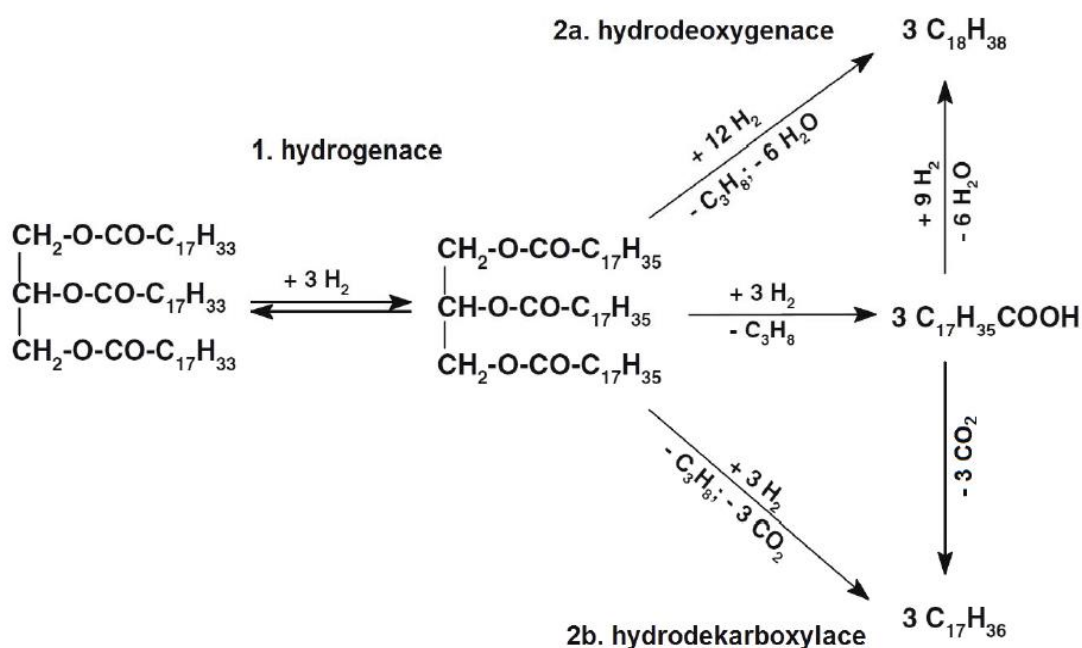
Katalytická hydrogenace rostlinných olejů je využívána pro ztužování tuků a je tedy pojmem známým především v potravinářském průmyslu. Cílem tohoto procesu je úplná nebo částečná hydrogenace uhlíkových řetězců nenasycených mastných kyselin, které jsou vázány v molekulách triacylglycerolů. Chemická podstata esterových skupin ovšem zůstává zachována, a to i v případě úplné hydrogenace, kdy je výsledným produktem směs triacylglycerolů nasycených mastných kyselin. Během hydrogenace rostlinných olejů, za účelem výroby alternativního dieselového paliva, nedochází ke vzniku triglyceridů, nýbrž uhlovodíků. Během hydrogenační přeměny rostlinných olejů na uhlovodíky tedy dochází k mnohem významnějším chemickým změnám, které vyžadují vyšší reakční teplotu a tlak. [21]

Proces hydrogenační přeměny rostlinných olejů na směs uhlovodíků bývá označován různými termíny. Pravděpodobně nejčastěji se lze setkat s termínem hydrogenace, dále ovšem také s hydrokrakování nebo hydrodeoxygenace. Ačkoli se s podobnou variabilitou označení setkáme i v cizojazyčné literatuře, pro konečné uhlovodíkové produkty se ustálila zkratka HVO, a to tedy hydrotreated vegetable oil. Jako HVO přitom bývají často označovány i produkty, kterými jsou upotřebené kuchyňské oleje a odpadní tuky. [21]

Hydrogenaci rostlinných olejů je možné provádět za pomoci velmi podobných katalyzátorů, jako je tomu v případě hydrogenační rafinaci ropných produktů. Těmito katalyzátory bývají obvykle kombinace kovů Ni, Mo, Co nebo také W, které jsou nanášeny na vhodném nosiči (alumina, zeolity). Katalyzátory však mohou být založeny i na bázi drahých kovů (Pd, Pt). Samotná hydrogenace probíhá ve vodíkové atmosféře, která dosahuje tlaku 20 MPa za teplot v rozmezí 300–420 °C. Při těchto podmínkách dochází k velkému množství dílčích reakcí, které způsobí přeměnu triglyceridů mastných kyselin na relativně jednoduchou směs uhlovodíků. Na obr. 4 [23] je uvedeno zjednodušené reakční schéma hydrogenace. Z důvodu zjednodušení je zde rostlinný olej reprezentován jako molekula trioleninu. Během procesu hydrogenace rostlinných olejů dochází nejprve k nasycení dvojných vazeb uhlovodíkových řetězců mastných kyselin, které jsou vázány v molekulách triglyceridů dvěma způsoby. Jedním z možných způsobů je hydrodeoxygenace, během které dochází k rozpadu molekul triglyceridu za tvorby propanu, 6 molekul vody a 3 molekul n-alkanů, které mají shodný počet uhlíkových atomů jako mastné kyseliny, které jsou vázány v původních molekulách trygliceridu. Vzhledem k tomu, že v případě triglyceridů rostlinných olejů jsou nejvíce zastoupeny kyseliny s osmnácti uhlíkovými atomy, výsledným produktem hydrodeoxygenace je n-oktadekan ( $C_{18}H_{38}$ ). Druhá možnost rozkladu triglyceridu je proces

hydrodekarboxylace, během kterého vzniká propan, 3 molekuly oxidu uhličitého a 3 molekuly n-alkanů s počtem atomů uhlíku o jedničku nižší než v případě mastných kyselin vázaných triglyceridu. Produktem hydrodekarboxylace je tedy n-heptadekan ( $C_{17}H_{36}$ ). [24] [25] [21]

Za předpokladu přeměny rostlinného oleje pouze hydrodekarboxylační cestou, dojde ke snížení výtěžku uhlovodíků asi o 5 % ve srovnání s hydrodeoxygenací. Důvodem je ztráta uhlíku v podobě  $CO_2$ . Ovšem v případě hydrodeoxygenační cesty vzniku uhlovodíků je vyžadováno až čtyřnásobné množství vodíku oproti hydrodekarboxylaci. Jako alternativní cesta vedoucí ke tvorbě n-heptadekanu bývá někdy uváděna hydrodekarboxylace, tento reakční mechanismus ovšem nebyl doposud jednoznačně potvrzen. [23]. Během hydrogenace rostlinných olejů bývají uplatňovány oba výše zmiňované reakční mechanismy. Konkrétní rozsah těchto reakčních mechanismů závisí na použitém katalyzátoru a na reakčních podmínkách. Na obr. 4 nejsou uvedeny následné reakce n-alkanů, které vedou ke vzniku dalších uhlovodíků. [25] [21]



Obr. 9 Zjednodušené reakční schéma hydrogenace rostlinného oleje [23]

Vstupní surovinou pro výše popisovaný hydrogenační proces mohou být jak surové nebo odpadní rostlinné oleje, tak i živočišné tuky. Kromě těchto tuků a olejů, které jsou složeny z triglyceridů mastných kyselin, je možné využít i volné mastné kyseliny. V tomto případě ovšem v průběhu hydrogenace nedochází ke vzniku propanu. [21]

## 2.8.2. Vlastnosti primárních produktů a jejich složení

Primární produkty procesu hydrogenace rostlinných olejů jsou čistě uhlovodíkové směsi s dominantním zastoupením n-heptadekanu a n-oktadekanu (obvykle tvoří více než 50 %). V závislosti na složení použitých rostlinných olejů obsahují hydrogenované oleje menší množství vyšších (do C<sub>24</sub>) a nižších (C<sub>15</sub> a C<sub>16</sub>) n-alkanů. Ostatní uhlovodíky jsou především ve formě isoalkanů (C<sub>17</sub> a C<sub>18</sub>). Všechny výše zmiňované uhlovodíky jsou nasycené, a tudíž se jedná o přirozenou součást motorové nafty vyrobené z ropy. Ovšem s tím rozdílem, že v případě hydrogenovaných olejů nenalezneme prakticky žádné aromatické uhlovodíky. Díky poměrně specifickému složení uhlovodíků hydrogenovaných olejů, mají ve srovnání s ropnou motorovou naftou relativně nízkou hustotu a mírně vyšší viskozitu. Díky absenci dvojných vazeb v molekulách hydrogenovaných olejů jsou téměř vyloučeny problémy s oxidační stabilitou známé u tradiční bionafty. Hydrogenované oleje mají taktéž výborné vlastnosti během spalování vznětovými motory charakterizované cetanovým číslem. V případě běžné ropné nafty a bionafty je tento parametr zpravidla do 57 jednotek, cetanové číslo hydrogenovaných olejů bývá vyšší než 70 jednotek. Výrazným nedostatkem hydrogenovaných olejů jsou ovšem jejich naprosto nevyhovující vlastnosti za nízkých teplot. Tato skutečnost je dána především vysokým obsahem n-heptadekanu a n-oktadekanu. Jedná se sice o uhlovodíky s vysokým cetanovým číslem (až 110 jednotek), ale k jejich vlastnostem patří také vysoký bod tání (+28 °C). Nízkoteplotní klíčové hodnoty u motorových naft jako jsou teplota vylučování parafinů a filtrovatelnost, většinou přesahují 20 °C. [26] [21]

Zmíněné nepříznivé nízkoteplotní vlastnosti primárních hydrogenovaných olejů do značné míry limitují jejich využití v čisté podobě jako alternativa ropné motorové nafty. V omezeném množství je ovšem možné tyto oleje využít jako složku motorové nafty, díky které dojde ke zvýšení jejího cetanového čísla, ovšem za doprovodu zhoršených nízkoteplotních vlastností. Právě díky těmto důvodům se v komerčním měřítku využívá dvoustupňové výroby hydrogenovaných olejů. V prvním stupni tak dochází k hydrogenaci, na níž navazuje izomerace. V průběhu izomerace dochází k přeměně n-alkanů na isoalkany. Následkem toho je obsah n-heptadekanu a n-oktadekanu ve finálním produktu výrazně nižší. Tímto způsobem dojde ke zlepšení nízkoteplotních vlastností natolik, že jsou hydrogenované oleje v tomto směru zcela srovnatelné s běžně používaným typem zimní motorové nafty (třída F). Veškeré zmiňované výhody hydrogenovaných olejů, včetně velmi vysokého cetanového čísla, přitom zůstávají zachovány. Jednoduchým označením HVO tedy běžně bývá označován finální

komerční produkt hydrogenace rostlinných olejů nebo také živočišných tuků, a to bez ohledu na množství dílčích operací, která tato technologie zahrnuje. [27] [21]

### **2.8.3. Výroba hydrogenovaných olejů**

Z popisu mechanismu hydrogenace rostlinných olejů a živočišných tuků je patrné, že jejich hlavním produktem je uhlovodíková směs. Tato směs svým destilačním rozmezím odpovídá běžně vyráběné ropné motorové naftě (cca 200–360 °C), ovšem kvalita tohoto alternativního paliva je významně vyšší než v případě bionafty (FAME) nebo ropné nafty samotné. Během průmyslové výroby hydrogenovaných olejů dochází mimo jiné také ke vzniku malého množství lehkých uhlovodíků. Podíl těchto uhlovodíků je možné do jisté míry ovlivnit provozními podmínkami této technologie. Kromě hydrogenovaných olejů vhodných jako alternativní palivo vznětových motorů taktéž dochází ke vzniku specifické obdoby benzínu a petrolejové frakce, přičemž petrolejová frakce je využitelná jako alternativní palivo pro letecké turbínové motory. Nutností je také zmínit skutečnost, že během procesu hydrogenace z 1 tuny zpracovávaného rostlinného oleje nebo živočišného tuku vzniká také přibližně 50 kg biopropanu. [21]

Nejnámějším a pravděpodobně také největším výrobcem hydrogenovaných olejů v Evropě je finská společnost Neste vyrábějící v rafineriích v Singapuru, Finsku a Nizozemí. Již v roce 2015 bylo vyrobeno 2,4 Mt hydrogenovaného oleje, přičemž tato hodnota představuje více než polovinu roční spotřeby motorové nafty na území ČR. Vstupními surovinami jsou přitom z více než 60 % odpadní oleje a tuky, kterými jsou například odpadní produkty z rafinace olejů, rybí tuk, zvířecí tuk. Takto získaný podíl vyrobeného hydrogenovaného oleje je tak možné označit jako biopalivo 2. generace. Zbýlých 40 % vstupních surovin je tvořeno především palmovým olejem nebo menším množstvím jiných olejů. Firma Neste do budoucna očekává, že za pomoci této technologie bude možné získávat hydrogenovaný olej, dokonce i z řas. Finální produkt hydrogenace nese komerční označení NExBTL renewable. Tento hlavní produkt je určen pro spalování vznětovými motory. Popisovaná technologie ovšem poskytuje i níže vroucí biopaliva, respektive uhlikové frakce jako letecký petrolej, benzin a také propan. Na trhu je možné se setkat s různými výrobci paliv typu HVO, tato paliva mají různá komerční označení, ovšem technologie jejich získávání zůstává ve většině případů velmi podobná. [28] [21]

## 2.8.4. Využití paliv HVO pro vznětové motory

Ve srovnání s bionaftou mají hydrogenované oleje, jako náhrada motorové nafty, jednoznačnou výhodu, která spočívá v jejich uhlovodíkové povaze. Zásadní je především jejich výrazně lepší oxidační stabilita a materiálová kompatibilita s palivovým systémem. Na HVO se tedy nevztahují žádná omezení související s jejich dopravou a skladováním, na rozdíl od bionafty. Je tedy možné libovolně využívat distribuční a skladovací systémy, které jsou určeny pro ropná paliva. V určitých ohledech jsou vlastnosti HVO lepší, než je tomu u ropné motorové nafty. Z těchto vlastností je možné jmenovat například nižší obsah síry, výrazně vyšší cetanové číslo a s ním související velice nízký obsah aromatických uhlovodíků. Dva poslední jmenované parametry příznivě ovlivňují nejenom emise polutantů, ale také provozní vlastnosti vznětových motorů. V Tab. 2 jsou zobrazeny vybrané vlastnosti produktu NExBTL, standardně vyrobené motorové nafty a bionafty vyrobené z řepkového oleje. [21]

Tab. 2 Vybrané vlastnosti motorové nafty, bionafty a paliva vyrobeného hydrogenací rostlinných olejů (NExBTL); zdroj dat: [21]

Parametr	Jednotka	Motorová nafta	Bionafta z řepkového oleje	HVO (NExBTL)
Složení		uhlovodíky	FAME	uhlovodíky
Hustota při 15 °C	kg/m <sup>3</sup>	833,5	882,5	778,6
Kin. Viskozita při 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	2,66	4,63	2,89
Cetanový index		52,2	58,5	93,1
Bod vzplanutí	°C	60	>120	83
Filtrovatelnost	°C	-24	-26	-38
Oxidační stabilita	h	196,1	9,8	30,8
Celkový obsah aromátů	% (m/m)	25	<0,1	<0,1
Obsah pol. aromatických uhlovodíků	% (m/m)	2,88	<0,01	<0,01
Obsah síry	mg/kg	8	4	<2
Destilační zkouška				
při 250 °C predestiluje	% (V/V)	40	0	7
při 350 °C predestiluje	% (V/V)	95	92	98
95 % (V/V) predestiluje při	°C	351	354	295

HVO je možné do ropné motorové nafty principiálně přidávat v libovolném množství, nicméně je nutné splnit limitující parametr hustoty, který je dán normou EN 590+A1. Hustota HVO je relativně nízká, a proto dochází ke snižování hustoty směsného paliva. V případě 30 obj. % HVO v ropné motorové naftě se hustota tohoto směsného paliva blíží k dolnímu limitu (820 kg.m<sup>3</sup>). V případě, že takové směsné palivo neobsahuje FAME, bude nutné toto směsné palivo aditivovat mazivostními přísadami, obdobně jako ropnou motorovou naftu neobsahující FAME. Se zvyšujícím obsahem HVO se ostatní parametry směsného paliva

zlepšují. Za významný přínos HVO lze považovat dříve zmiňovaný nárůst cetanového čísla. Budeme-li uvažovat obsah HVO 30 obj. % v ropné naftě dojde k nárůstu cetanového čísla až o 10 jednotek. S motorovou naftou obsahující podíl HVO je možné se setkat i na území ČR, a to například pod obchodním označením Maxmottion Diesel na čerpacích stanicích OMV. Nutností je také zmínit možnost používání HVO jako 100% náhradu ropné motorové nafty. K těmto účelům byla vydána evropská technická specifikace definující požadavky na takzvaná „parafinická dieselová paliva“ zahrnující i paliva HVO. Čisté HVO bylo již v rámci různých projektů úspěšně používáno pro pohon vznětových motorů uzavřených flotil motorových vozidel. [28] [29] [21]

Vysoké hodnoty cetanového čísla výrazně souvisí s velmi nízkými hodnotami aromatických uhlovodíků. Tyto uhlovodíky mají obecně při spalování velký sklon tvořit pevné částice. Paliva HVO a směsná paliva obsahující HVO mají tedy menší předpoklad k tvorbě pevných částic. Tento předpoklad byl potvrzen různými studiemi, během kterých byly ve vznětových motorech spalovány jak směsi paliv s HVO, tak i čisté HVO. Přičemž bylo prokázáno nejenom snížení emisí částic, ale také ostatních regulovaných složek (uhlovodíky, CO, NO<sub>x</sub>). U čistého HVO došlo ve srovnání s ropnou motorovou naftou o snížení emisí částic cca o 25–46 %, emisí uhlovodíků o 50 %, CO o 50 % a také snížení NO<sub>x</sub> o 6–16 %. [30] [21]



*Obr. 10 Hoření 100 % HVO (vlevo) a ropné nafty (vpravo) [31]*

Ke snížení emisí dochází i v případě skleníkových plynů. Například společnost Neste uvádí [28], že dle surovin použitých k výrobě NExBTL je možné dosáhnout úspory emisí skleníkových plynů o 40-90 % ve srovnání s používáním ropné motorové nafty. Budeme-li uvažovat, že je možné přidávat HVO do ropné motorové nafty až do 30 obj. %, jedná se o palivo s mnohem vyšším potenciálem ve snižování emisních skleníkových plynů, nežli je tomu v případě bionafty (FAME). [21]



### 3. Cíl práce

Obecným cílem této diplomové práce je přispět ke snaze nalezení ideálního alternativního paliva vedoucího ke snížení množství spotřebovávaných ropných surovin. A zároveň podpořit úsilí vedoucí ke snížení škodlivých emisí výfukových plynů podílejících se na zrychleném globálním oteplování a na negativních dopadech na lidské zdraví

Konkrétním cílem experimentální části je ověření vlivu testovaných paliv na změny provozních parametrů vznětového motoru a jejich následné vyhodnocení. Pozornost bude věnována zejména emisím výfukových plynů, množství a velikosti vznikajících pevných částic a dále také měrné spotřebě paliva, točivému momentu a výkonu motoru, při použití směsi hydrogenovaného rostlinného oleje a motorové nafty. Správné pochopení změn zkoumaných parametrů umožní systematické porovnání jednotlivých experimentálních paliv z hlediska jejich využitelnosti a vhodnosti jejich použití.

Tohoto cíle je dosaženo prostřednictvím dílčích cílů:

- Experimentálním ověřením vlivu testovaných paliv na produkci sledovaných emisí.
- Experimentálním ověřením vlivu testovaných paliv na teplotu výfukových plynů.
- Experimentálním ověřením vlivu testovaných paliv na měrnou spotřebu vznětového motoru.
- Experimentálním ověřením vlivu testovaných paliv na točivý moment a výkon motoru.

## 4. Metodika práce

V této kapitole je uveden podrobný postup a taktéž jednotlivá zařízení, kterými bylo měření prováděno, za účelem získání a následného porovnání sledovaných parametrů.

Veškerá měření námi sledovaných parametrů byla prováděna v laboratoři Katedry jakosti a spolehlivosti strojů nacházející se v prostorách Technické fakulty České zemědělské univerzity Praze. Tato měření byla provedena na traktoru Zetor Forterra 8641 viz obr. 11 s přeplňovaným vznětovým motorem typu 1204, který se nikterak neodlišuje od sériových parametrů tohoto traktoru. Zatížení motoru bylo průběžně vyvozeno přes zadní vývodový hřídel, na kterém byl připojen dynamometr MAHA ZW-500. Aby bylo umožněno porovnávat provozní parametry jednotlivých paliv, bylo nutné odpojení standardní palivové nádrže a následné připojení nádrže externí, která byla umístěna na laboratorní váze VIBRA AJ-6200. Touto laboratorní vahou byly následně zaznamenávány úbytky hmotností jednotlivých paliv, na jejichž základě bylo následně možné určit spotřebu testovaných paliv. Sání čerstvého vzduchu bylo umístěno mimo prostor traktoru, a to za pomoci plastové trubky. V těsné blízkosti za sacím otvorem byla umístěna U-trubice, ze které byly v průběhu měření zaznamenávány data sloužící k určení množství nasávaného vzduchu. Do části výfukového potrubí byly instalovány sondy částicového analyzátoru TSI EEPS 3090 a taktéž analyzátoru plynných emisí Bruker Matrix MG-5. Výstupní data jednotlivých měřicích zařízení byla v průběhu měření ukládána a následně zpracována v MS Excel.



Obr. 11 Traktor Zetor Forterra 8641; Zdroj vlastní

## 4.1. Postup měření

Před samotným zahájením laboratorního měření musela být nejprve namíchána testovaná paliva ve správném poměru a v dostatečném množství. Tato paliva byla tvořena směsí čisté motorové nafty neobsahující žádné biosložky (D100) a hydrogenovaným rostlinným olejem (HVO). Dále musel být traktor a dynamometr zajištěn proti nechtěnému pohybu a motor traktoru zahřátý na provozní teplotu. V případě nedostatečného zahřátí motoru traktoru by mohlo dojít k výraznému ovlivnění měřených dat. V průběhu zahřívání byl důkladně propláchnut palivový systém a po dosažení provozní teploty motoru a ověření funkčnosti měřících přístrojů bylo zahájeno měření.

Pro každé z paliv byla naměřena vnější otáčková charakteristika motoru. Toto měření probíhá následujícím způsobem: Nejprve dojde ke spuštění zadního vývodového hřídele a ustavení plynové páky na poloze maximální dodávky paliva, která je v této poloze ponechána po celou dobu měření otáčkové charakteristiky. Připojený dynamometr na zadní vývodový hřídel traktoru doposud nevyvozuje žádný brzdný moment, motor je tedy nezatížen a jeho otáčky se pohybují na úrovni maxima. Poté, co dojde k zahájení měřícího cyklu, dynamometr začne vyvozovat pomalu se zvyšující brzdý moment, jehož příčinou postupně dochází k poklesu otáček motoru. V průběhu popisovaného měření dochází v pravidelných intervalech k ukládání dat, a to zejména otáček motoru, otáček vývodového hřídele, výkonu, točivého momentu. Pokud dojde k poklesu otáček na hranici  $1100 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  měřená data jsou zaznamenána a měření je ukončeno.

Dále bylo uskutečněno měření při pevně nastavených jmenovitých otáčkách  $1950 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Za těchto konstantních otáček byl motor zatěžován dynamometrem ve třech krocích, a to při 50 %, 70 % a 100 % zatížení. Toto měření bylo opakováno pro jednotlivá paliva a v každém bodu měření byly zaznamenávány jednotlivé provozní parametry po dobu cca 80 sekund. Hlavními měřenými daty byly: emise výfukových plynů, množství a velikost vznikajících pevných částic, spotřeba paliva, točivý moment a výkon motoru. Naměřená data byla následně vyhodnocena a statisticky zpracována v MS Excel.

## 4.2. Měřicí přístroje a zařízení

### Spalovací motor Zetor 1204

K měření vlivů jednotlivých směsí paliv na provozní parametry vznětového motoru byl vybrán traktor Zetor Foterra 8641, který je vybaven přeplňovaným vznětovým čtyřválcovým motorem typu 1204. Tento traktor se nikterak neliší od sériově vyráběného modelu a jeho technické parametry jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3 Technická data motoru Zetor 1204

Technické parametry testovaného vznětového motoru		
Parametr	Jednotky	Specifikace
Druh motoru		Vznětový, čtyřdobý
Typ motoru		1204
Provedení		Řadový, podélně uložený, vodou chlazený
Plnění		Přeplňovaný turbodmychadlem
Počet válců		4
Druh rozvodu		OHV
Zdvihový objem	[cm <sup>3</sup> ]	4156
Vrtání x zdvih	[mm]	105 x 120
Jmenovité otáčky	[ot·min <sup>-1</sup> ]	2200
Pořadí vstřikování		1-3-4-2
Kompresní poměr		17
Maximální přeběhové otáčky	[ot·min <sup>-1</sup> ]	2460
Volnoběžné otáčky	[ot·min <sup>-1</sup> ]	750 +/- 25
Výkon při jmenovitých otáčkách	[kW]	60
Měrná spotřeba při max. výkonu	[g·kW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	253
Točivý moment	[Nm]	351
Převýšení točivého momentu	[%]	35
Mazání motoru		Tlakové
Čistič oleje		Plno průtočný
Tlak oleje při jm. otáčkách a teplotě oleje 80 °C	[MPa]	0,2–0,5
Min. tlak oleje při volnoběžných otáčkách a teplotě oleje 80 °C	[MPa]	0,05
Max. teplota chladicí kapaliny	[°C]	106
Filtrace paliva		Jednostupňová s výměnnou vložkou
Otevírací tlak vstřikačů	[MPa]	22 (26)
Úhel předstihu vstřikačů	[°]	12
Vůle ventilů při studeném motoru, sací/výfukový	[mm]	0,25 +/- 0,05

## Dynamometr

Pro účely stanovení jednotlivých výkonových parametrů na vývodovém hřídeli motoru bylo užito dynamometru MAHA ZW-500. Tento dynamometr je schopen vyvozovat brzdny moment na vývodový hřídel, a tak ovlivňovat celkové zatížení motoru. Jedná se o dynamometr opatřený dvěma brzdami na vířivý proud, který je určen pro zemědělské stroje o maximálním výkonu 500 kW. Software dynamometru umožňuje zaznamenání výkonových parametrů za konstantních otáček pomocí automatické regulace, případně při konstantním točivém momentu regulací točivého momentu. Dynamometr MAHA ZW-500 taktěž umožňuje funkce jako jsou: snímání otáček motoru a spojovacího kardanového hřídele dynamometru s vývodovým hřídelem traktoru, kompenzace ztráty brzdny síly závislé na otáčkách nebo také připojení senzoru k měření spotřeby paliva. Technické parametry dynamometru jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4 Technické parametry dynamometru

<b>Technické parametry dynamometru MAHA ZW-500</b>	
Měřicí systém	DMS – technika
Max. otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]	2500
Maximální moment [Nm]	6600
Brzdy vířivými proudy / max – výkon	500 kW
Klínový profil hřídele	1 3/4" 6 ti dílný
Jištění [A]	16
Napájecí zdroj	3/N/PE, 400 V, 50/60 Hz, 16 A
Rozměry (D x Š x V) [mm]	3580 x 2110 x 1420
Váha [kg]	1300

## Emisní analyzátor

Pro detekci emisí výfukových plynů bylo využito emisního analyzátoru Bruker MATRIX-MG5 viz obr. 12, fungujícího na základě infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR). Tato metoda je založena na částečné absorpci infračerveného světla pronikajícího vzorkem. V průběhu zmiňované absorpce dochází ke změnám energetických stavů molekul, a to v závislosti na změnách dipólového momentu molekuly. Výsledné infračervené spektrum je funkční závislostí energie vyjádřené v procentech transmitance nebo v jednotkách absorpce na vlnové délce dopadajícího záření. Pro vyhodnocení jednotlivých emisních složek byl využit software Opus, který je poskytován výrobcem. Za pomoci tohoto softwaru byly analyzovány tyto plyny: oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ), oxid uhelnatý (CO), formaldehyd

(HCHO), methan (CH<sub>4</sub>), acetaldehyd (CH<sub>3</sub>CHO), butadien (C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>), oxidy dusíku (NO<sub>x</sub>). Hodnoty oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>) jsou dány součtem hodnot oxidu dusnatého (NO) a oxidu dusičitého (NO<sub>2</sub>). Data z emisního analyzátoru byla zaznamenávána s frekvencí 5 Hz. Z naměřených objemových koncentrací byly hmotnostní koncentrace vypočteny pomocí molárních hmotností jednotlivých emisních složek. Technické parametry použitého emisního analyzátoru jsou uvedeny v Tab. 5

Tab. 5 Technické parametry emisního analyzátoru

Technické parametry emisního analyzátoru Bruker MATRIX-MG5	
Parametr	Specifikace
Spektrální rozsah	4800–750 cm <sup>-1</sup>
Detektor	Rtuť-kadmium-telurid chlazený kapalným dusíkem
Interferometr	Rocksolid™, s permanentním zaostřováním
Spektrální rozlišení	<1 cm <sup>-1</sup>
Vzorkování	4 spektra při 4 cm <sup>-1</sup> spektrálního rozlišení 1 spektrum při 0.5 cm <sup>-1</sup> spektrálního rozlišení
Přesnost vlnové délky	> 0.05 cm <sup>-1</sup>
Fotometrická přesnost	> 0.1 %



Obr. 12 Emisní analyzátor Bruker MATRIX-MG5 [32]

## Částicový analyzátor

Pro měření pevných částic obsažených ve výfukových plynech bylo využito částicového analyzátoru TSI EEPS 3090. Tento analyzátor pracuje s rozsahem velikostí částic od 5,6 do 560 nm o vzorkovací frekvenci 10 Hz. Za pomoci tohoto analyzátoru je možné sledovat množství pevných částic obsažených ve výfukových plynech v jednotlivých velikostních spektrech a jejich dynamické změny v průběhu měření. Analyzátor odebírá surový vzorek části výfukových plynů a v rotační ředičce jej ředí stavitelným ředícím poměrem. Technické parametry částicového analyzátoru jsou uvedeny v Tab. 6

Tab. 6 Technické parametry částicového analyzátoru

Technické parametry částicového analyzátoru TSI EEPS 3090	
Parametr	Specifikace
Rozsah měřených velikostí částic	5,6–560 nm
Rozlišení	16 kanálů na dekádu (32 kanálů celkem)
Průtok vzorku	10 dm <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup>
Vzorkovací frekvence	10 Hz
Počet elektroměrů	22
Teplota vzorku	10–52 °C
Provozní teplota	0–40 °C
Provozní tlak (autokorekce přístrojem)	70–103 kPa



Obr. 13 Částicový analyzátor TSI EEPS 3090 [33]

## Váha

Spotřeba paliva byla měřena za pomoci laboratorní váhy Vibra AJ 6200, na které byla umístěna externí palivová nádrž. Tato laboratorní váha měří v rozsahu od 0 do 6200 g o přesnosti 0,1 g a rozlišení 0,01 g. Technické parametry použité váhy Vibra AJ 6200 jsou uvedeny v Tab. 7.

Tab. 7 Technické parametry laboratorní váhy

Technické parametry laboratorní váhy VIBRA AJ 6200	
Parametr	Specifikace
Maximální váživost	6200 g
Přesnost	0,01 g
Komunikační rozhraní	RS232C
Přípustná teplota prostředí	0 °C–35 °C
Funkce	Vážení, počítání kusů, tárování, procentní vážení, stanovení hustot látek, nastavení a signalizace limit, volba jednotek váhy
Jednotky vážení	g (gram), oz (unce), lb (libra), ct (karát), ozt (trojská unce)

## Množství nasávaného vzduchu

Pro monitorování hmotnostního průtoku vzduchu byla využita bezztrátová dýza v kombinaci s U-trubicí. Naměřené objemové koncentrace emisních složek byly za pomoci molárních hmotností přepočítány na hmotnostní.

## 4.3. Použité palivové směsi

Za účelem našeho měření byly na Technické fakultě České zemědělské univerzity připraveny celkem dvě palivové směsi. Tou byla motorová nafta bez přidaných biosložek smíchána s 5 a 10 obj. % hydrogenovaného rostlinného oleje. Tato paliva představují jistý potenciál vedoucí ke snížení závislosti na fosilních palivech a taktéž ke snížení produkovaných emisí vznětových motorů. Referenčním palivem je motorová nafta. Vlastnosti použitých paliv jsou popsány v Tab. 8.

### Přehled experimentálních paliv

- Čistá motorová nafta neobsahující biosložky (D100)
- HVO B-5 (95 obj. % motorové nafty + 5 obj. % hydrogenovaného oleje)
- HVO B-10 (90 obj. % motorové nafty + 10 obj. % hydrogenovaného oleje)



Hydrogenované rostlinné oleje ( $781,33 \text{ kg}\cdot\text{m}^3$ ) mají ve srovnání s běžně používanou motorovou naftou ( $835 \text{ kg}\cdot\text{m}^3$ ) výrazně nižší hustotu. Dle normy ČSN EN 590+A1 je stanoven dolní limit hustoty motorové nafty na  $820 \text{ kg}\cdot\text{m}^3$ . Z tohoto důvodu není vhodné připravovat paliva s vyšším podílem HVO, nežli je 30 %, limit hustoty daný normou by tak nebyl splněn. Jednotlivé vlastnosti HVO se od motorové nafty poměrně výrazně liší (viz Tab. 2 str. 30). Hustota a viskozita použitých paliv byla změřena za použití Stabingerova viskozimetru SVM 3000 od firmy Anton Paar GmbH (nepřesnost měření  $<1 \%$ , opakovatelnost =  $0.1 \%$ ).

Tab. 8 Vlastnosti použitých směsných paliv

Vlastnosti použitých paliv				
Parametr	Motorová nafta	HVO	HVO B-5	HVO B-10
Výhřevnost [ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	43,15	44	43,19	43,23
Hustota při $15 \text{ }^\circ\text{C}$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	835	781,33	833,3	830,27
Kin. viskozita při $40 \text{ }^\circ\text{C}$ [ $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ]	2,587	2,889	2,649	2,623
Bod vzplanutí [ $^\circ\text{C}$ ]	60	83		
Cetanové číslo [-]	51	84-99		
Cetanový index [-]	52,2	93,1		

V uvedené tabulce jsou patrné rozdíly v jednotlivých vlastnostech daných paliv. Vlivem smíchání motorové nafty s HVO ve stanovených poměrech můžeme pozorovat postupné zvyšování hodnot, a to například u výhřevnosti. Tyto hodnoty se významně podílejí na změnách výkonových parametrů. Hodnota výhřevnosti udává množství energie obsažené v přesně definovaném množství paliva. Cetanové číslo vyjadřuje spalovací vlastnosti nafty. Vyšší hodnota cetanového čísla HVO zajišťuje kratší prodlevu vznícení nafty a taktéž k nárůstu tlaku ve spalovacím prostoru nedochází tak náhle. Spalování nafty s vysokým cetanovým číslem je tak „měkčí“ a tišší. Naopak relativně nízká hustota HVO může být příčinou zvýšené spotřeby paliva a snížení výkonu. Povšimnout si lze také relativně vysoké kinematické viskozity HVO. Zvýšení kinematické viskozity se může negativně podílet na kvalitě rozptýlování paliva ve spalovacím prostoru. V případě špatného rozptýlování paliva se můžeme setkat se zhoršeným spalováním, vyšší tvorbou úsad ve spalovacím prostoru a také s větším množstvím pevných částic obsažených ve výfukových plynech.

## 5. Výsledky měření

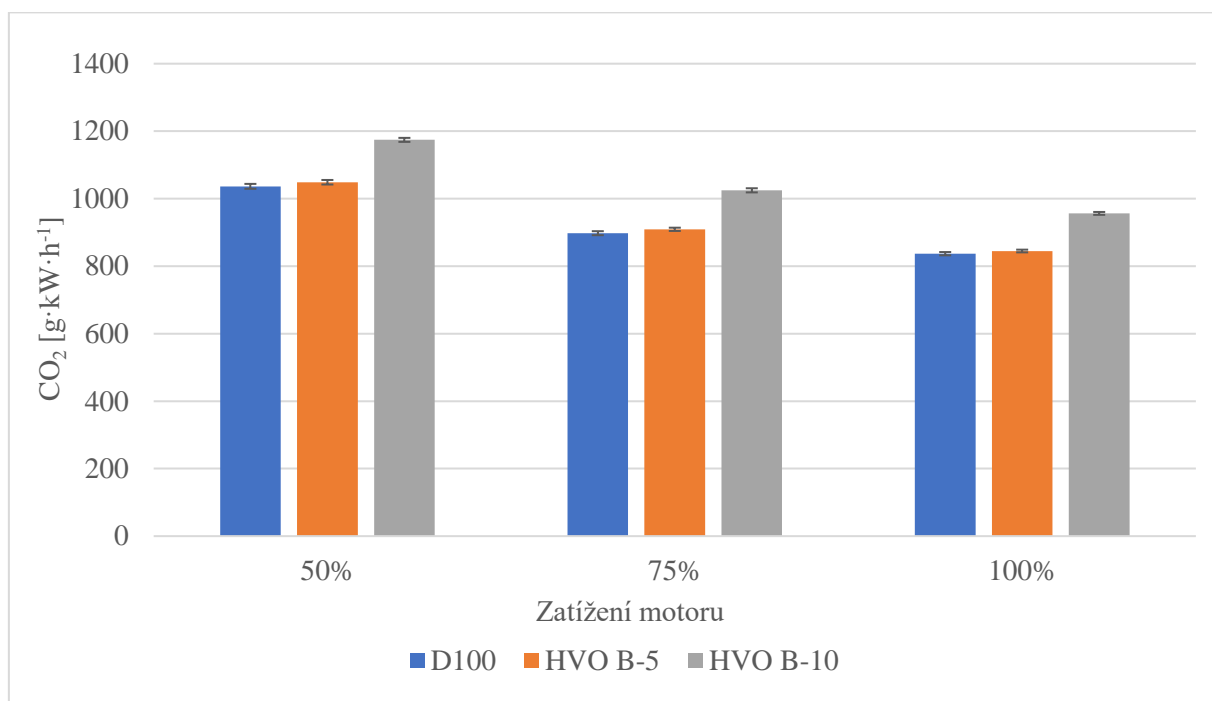
V následující kapitole jsou porovnávány výsledky měřených provozních parametrů vznětového motoru v závislosti na druhu použitého paliva. Tyto výsledky jsou zkoumány a porovnávány v jednotlivých podkapitolách, které obsahují grafy zobrazující změny daných provozních parametrů, při použití experimentálních paliv (HVO B-5, HVO B-10) a referenčního paliva, motorové nafty (D100). U každého z uvedených grafů nalezneme komentář popisující rozsah změn provozních parametrů u jednotlivých experimentálních paliv a nastínění možných příčin těchto změn. Veškerá naměřená data byla získána dle uvedené metodiky a následně početně a graficky zpracována v MS Excel.

Vzhledem k hlavnímu zaměření této práce na změny emisí výfukových plynů, budou nejprve porovnávány změny těchto hodnot. Ve zbylé části této práce budou zobrazena data, u nichž taktéž došlo ke změně provozních parametrů vlivem použití zkoumaných paliv.

- V první podkapitole jsou porovnávány vlivy experimentálních paliv na vznik emisí výfukových plynů, kterými jsou: CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O, C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>, NO, NO<sub>x</sub>. A taktéž zastoupení plynů NO a NO<sub>2</sub> v emisích NO<sub>x</sub>
- Ve druhé kapitole jsou porovnávány vlivy experimentálních paliv na vznikající množství a střední velikost pevných částic.
- Ve třetí kapitole jsou porovnávány vlivy experimentálních paliv na teplotu výfukových plynů.
- Ve čtvrté kapitole jsou porovnávány změny měrné spotřeby při použití testovaných paliv.
- V páté kapitole je porovnáván vliv testovaných paliv na změny točivého momentu a výkonu vznětového motoru.

## 5.1. Změny emisí výfukových plynů pro konkrétní paliva

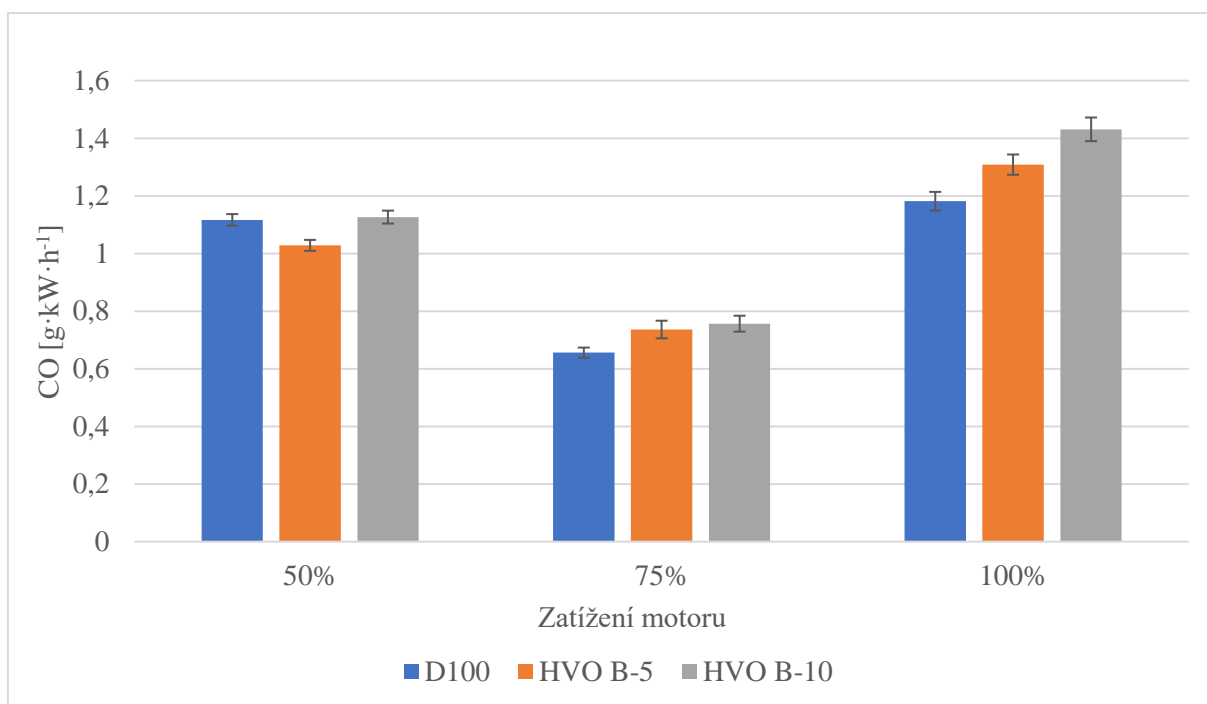
### 5.1.1. Emise oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>)



Graf 1 Emise CO<sub>2</sub> při daném zatížení vznětového motoru

Graf č. 1 znázorňuje tvorbu emisí oxidu uhličitého při použití jednotlivých paliv, a to ve třech bodech měření (50 %, 70 %, 100 %). U každého z těchto bodů můžeme pozorovat zvyšující se tvorbu emisí CO<sub>2</sub> u experimentálních paliv ve srovnání s referenčním palivem, motorovou naftou. U paliva HVO B-5 došlo ke zvýšení tvorby CO<sub>2</sub> v rozsahu 0,95–1,27 %. Tyto hodnoty představují relativně malý nárůst ve srovnání s palivem D100. Namísto toho u paliva HVO B10 lze pozorovat vyšší nárůst, který se pohybuje v rozsahu 13,3–14,26 %. Z grafu je patrné, že se zvyšujícím se zatížením motoru klesá tvorba emisí CO<sub>2</sub>, a to u všech zkoumaných paliv. Ačkoli je v současné době kladen důraz na co nejnižší emise oxidu uhličitého, jedná se o plyn, který je společně s H<sub>2</sub>O výsledkem dokonalého spalování. Zvýšené hodnoty tvorby zmiňovaného plynu mohou být způsobeny zvýšením cetanového čísla u experimentálních paliv. Toto zvýšení může příznivě ovlivňovat způsob odhořívání vstříknutého paliva, díky kterému dochází ke zlepšení oxidace CO na CO<sub>2</sub>. Zvýšená tvorba oxidu uhličitého u experimentálních paliv může být taktéž ovlivněna množstvím uhlíku obsaženém v samotném HVO, nižším obsahem aromatických uhlovodíků, zvýšenou spotřebou paliva nebo změnou teploty při které dochází ke spalování.

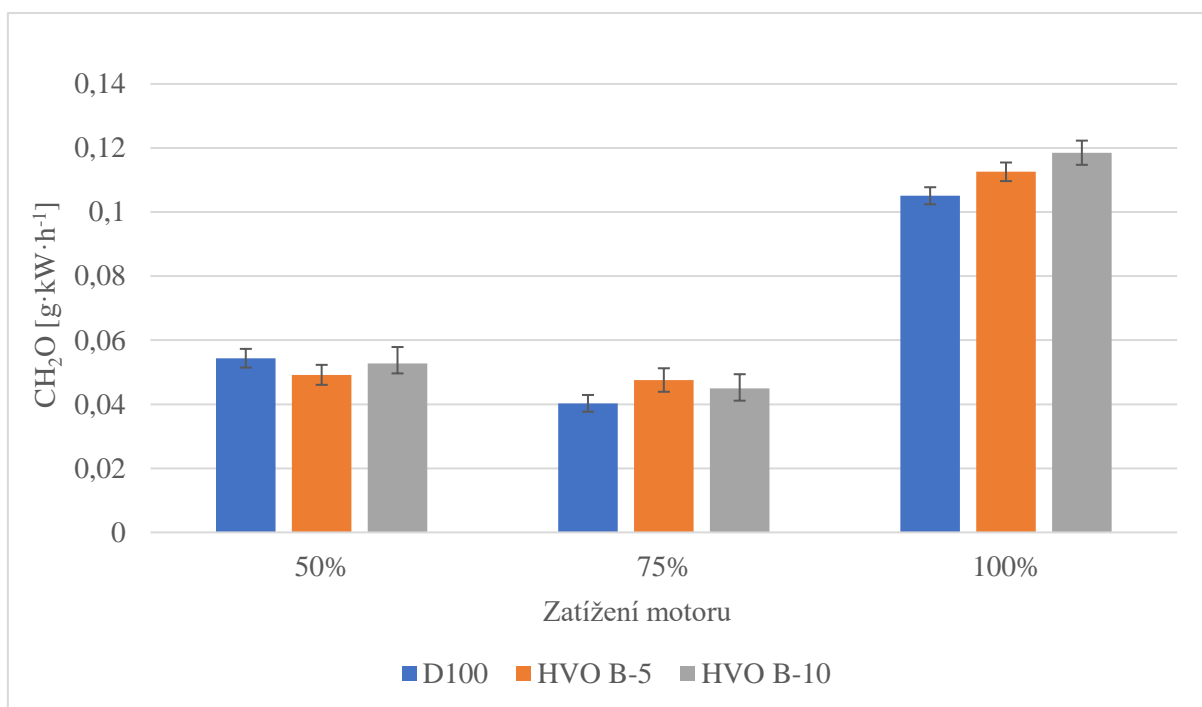
### 5.1.2. Emise oxidu uhelnatého (CO)



Graf 2 Emise CO při daném zatížení vznětového motoru

Graf č. 2 vyobrazuje množství vznikajících emisí oxidu uhelnatého při použití jednotlivých paliv, a to ve třech bodech zatížení motoru (50 %, 70 %, 100 %). Oxid uhelnatý je jedovatý plyn, který je produktem nedokonalého spalování. Z uvedeného grafu je patrné, že k nejnižší tvorbě CO u všech použitých paliv dochází při zatížení motoru na 75 %. Naopak k nejvyšší tvorbě dochází při plně zatíženém motoru (100 %). U experimentálního paliva HVO B-5 v porovnání s referenčním palivem lze v případě 50% zatížení motoru pozorovat pokles o 7,9 %, zbylé hodnoty jsou rostoucí v rozsahu 10,8–12,2 %. U paliva HVO B-10 pozorujeme zvýšení tvorby CO u všech testovaných zatížení motoru, tyto hodnoty ve srovnání s referenčním palivem vzrostly o 0,8–21,1 %. Jak již bylo zmíněno tvorba oxidu uhelnatého je příčinou nedokonalého spalování a nedochází tak k efektivní oxidaci CO na CO<sub>2</sub>. Na tvorbu oxidu uhelnatého má vliv teplota spalování a zejména nedostatek kyslíku. Tento faktor je ovšem třeba brát v potaz především u motorů zážehových, kde je množství nasávaného vzduchu regulováno škrtkicí klapkou. Motory vznětové pracují s přebytkem vzduchu. Možnou příčinou převážně zvýšených hodnot produkce CO může být, stejně jako v případě zvýšených hodnot CO<sub>2</sub>, vyšší množství uhlíku obsaženého v HVO. Neméně podstatný vliv na kvalitu spalování má dozajista zvyšující se kinematičká viskozita experimentálních paliv. Ta má za následek zhoršené rozptýlení palivové směsi ve spalovacím prostoru. Rozptýlené kapičky paliva hůře odhořívají, což se významně podílí na zhoršení oxidace CO a tvorbě pevných částic.

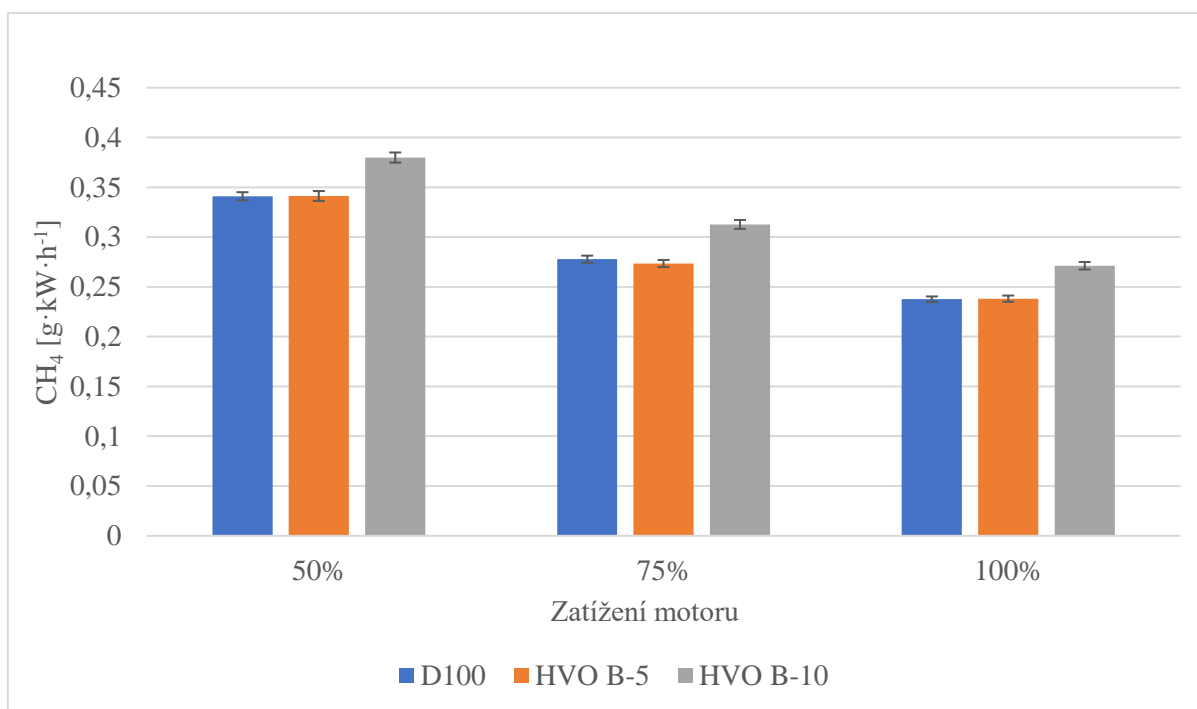
### 5.1.3. Emise formaldehydu (CH<sub>2</sub>O)



Graf 3 Emise CH<sub>2</sub>O při daném zatížení vznětového motoru

Na grafu č. 3 jsou uvedena množství produkovaných emisí formaldehydu (CH<sub>2</sub>O) pro jednotlivá paliva ve třech bodech měření, a to při zatížení motoru na 50 %, 75 % a 100 %. Formaldehyd je bezbarvý, štiplavě páchnoucí jedovatý plyn, který je dle Mezinárodní agentury pro výzkum rakoviny klasifikován jako karcinogen 1. skupiny, tedy prokázaný karcinogen pro člověka. V uvedeném grafu je možné si povšimnout proměnlivých hodnot tvorby CH<sub>2</sub>O u jednotlivých typů použitých paliv a daných zatížení. V případě paliva HVO B-5 byl zaznamenán pokles tvorby CH<sub>2</sub>O při 50% zatížení o -9,5 %, naopak u 75% zatížení a 100% zatížení byl zaznamenán nárůst o 18 % a 7,1 %. Použití paliva HVO B-10 prokázalo taktéž relativně proměnlivé hodnoty tvorby CH<sub>2</sub>O, při 50% zatížení motoru můžeme pozorovat pokles tvorby zmiňovaného plynu o -2,9 %, 75% zatížení motoru prokázalo nárůst emisí CH<sub>2</sub>O o 11,4 % a 100% zatížení nárůst o 12,7 %. Průměrná hodnota tvorby formaldehydu při použití paliva HVO B-5 ve srovnání s referenčním palivem tedy vzrostla o 5,21 %. U paliva HVO B-10 pozorujeme taktéž zvyšující se hodnoty tvorby CH<sub>2</sub>O, a to průměrně o 7,11 %. Jelikož tvorba formaldehydu je spojena především se spalováním methanolu (meziprodukt oxidace methanolu), námi naměřené hodnoty lze hodnotit jako relativně nízké. Z tohoto důvodu je třeba zohlednit směrodatné odchylky, které jsou zobrazeny u každé z naměřených hodnot. Použitá experimentální paliva HVO B-5 a HVO B-10 tedy neprokazují nikterak zásadně zvyšující se hodnoty tvorby CH<sub>2</sub>O při jejich užití.

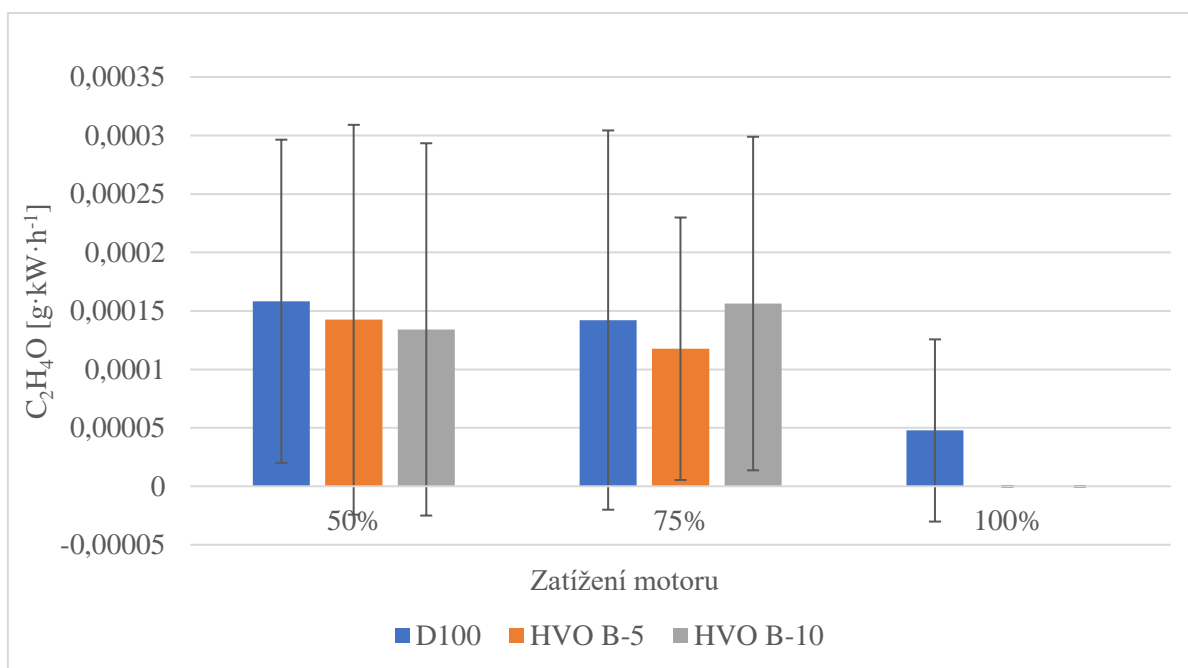
### 5.1.4. Emise methanu (CH<sub>4</sub>)



Graf 4 Emise CH<sub>4</sub> při daném zatížení vznětového motoru

Graf č. 4 vyobrazuje množství vznikajících emisí methanu CH<sub>4</sub> ve třech bodech měření pro jednotlivá paliva, a to ve třech bodech při zatížení motoru 50 %, 75 %, 100 %. Methan je nezapáchající netoxický plyn, který je nejjednodušším stabilním uhlovodíkem. Z uvedeného grafu je patrná postupná tendence snižování tvorby CH<sub>4</sub> se zvyšujícím se zatížením motoru. Při použití paliva HVO B-5 byl oproti referenčnímu palivu zaznamenán jen velmi malý rozdíl v produkci CH<sub>4</sub>. U zatížení motoru na 75 % byl zaznamenán mírný pokles tvorby CH<sub>4</sub>, a to o -1,55 %. Zbylá zatížení motoru (50 %, 100 %) prokázala mírný nárůst tvorby CH<sub>4</sub> v rozsahu 0,09 % - 0,23 %. U experimentálního paliva HVO B-10 již můžeme pozorovat zvýšené hodnoty tvorby CH<sub>4</sub> u všech měřených zatížení motoru. K nejvyšší procentuální změně, v porovnání s referenčním palivem D100, došlo při 100% zatížení motoru, kdy tato změna činila 14,1 %. Při zatížení 50 % pozorujeme nárůst o 11,4 % a v případě 75% zatížení motoru nárůst tvorby CH<sub>4</sub> činí 12,5 %. Průměrná hodnota tvorby CH<sub>4</sub> u experimentálního paliva HVO B-5 klesla, a to o -0,4 %. Namísto toho u paliva HVO B-10 se průměrná hodnota tvorby CH<sub>4</sub>, v porovnání s D100, zvýšila o 12,7 %. Tvorbu methanu u vznětových motorů lze hodnotit jako velmi nízkou.

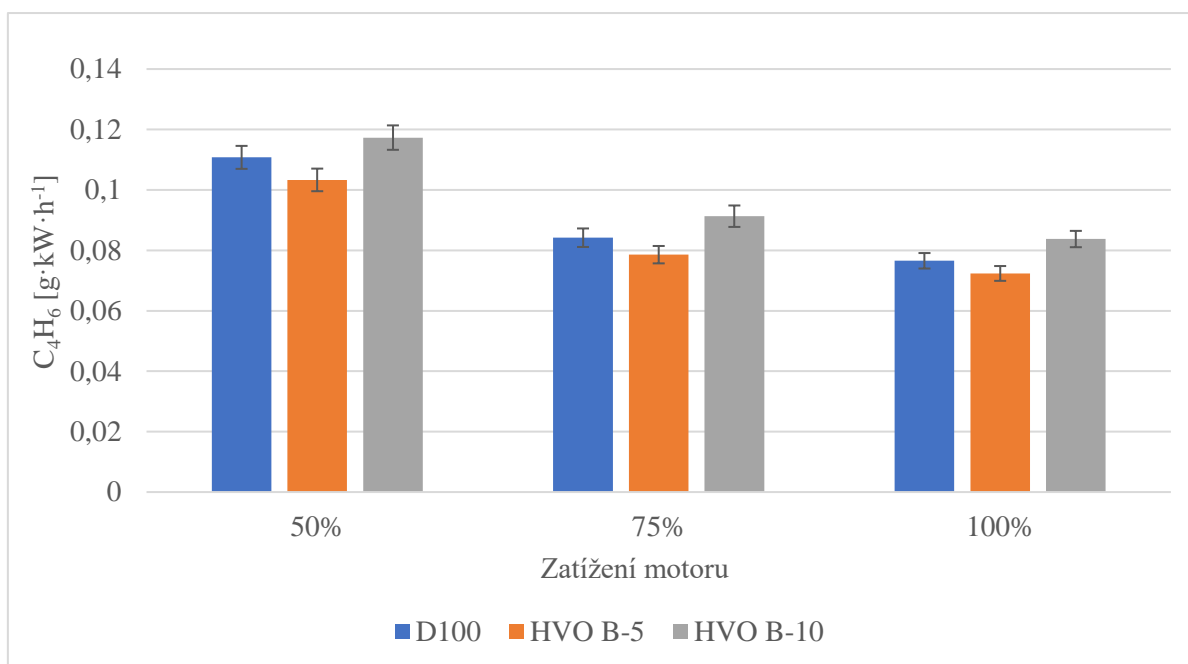
### 5.1.5. Emise acetaldehydu (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O)



Graf 5 Emise C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O při daném zatížení vznětového motoru

Na grafu č. 5 jsou uvedena množství produkovaných emisí acetaldehydu (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O) pro jednotlivá paliva ve třech bodech měření, a to při zatížení motoru na 50 %, 75 % a 100 %. Acetaldehyd je bezbarvá, těkává hořlavá kapalina štiplavého zápachu, přičemž její teplota varu je pouhých 20,2 °C. Acetaldehyd (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O) vzniká především oxidací ethanolu. Z tohoto důvodu lze očekávat jeho téměř zanedbatelné množství v emisích vznikajících spalováním motorové nafty a HVO. Z uvedeného grafu je patrné, že množství vznikajícího C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O je jen velmi malé, a je tedy téměř na hranici rozlišovací schopnosti použitého emisního analyzátoru (Bruker MATRIX-MG5). Změny naměřených hodnot tvorby C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O při použití paliva HVO B-5 se ve srovnání s referenčním palivem D100 pohybují v rozsahu od -100 % do -10 %. Vypočtený procentuální rozdíl -100 % při 100% zatížení motoru je dán nulovou hodnotou tvorby C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O, která byla naměřena. Průměrný pokles tvorby C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O u použitého paliva HVO B-5 činí -42,4 %. U experimentálního paliva HVO B-10 byly vypočteny procentuální změny tvorby C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O v rozsahu od 10 % do -100 %. Nárůst tvorby C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O o 10 % byl zaznamenán při 75% zatížení motoru. Naopak pokles tvorby C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O byl, stejně jako v případě použití paliva HVO B-5, zaznamenán u 100% zatížení, kdy je tato hodnota dána nulovou hodnotou tvorby C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O. Průměrný pokles při použití experimentálního paliva HVO B-10, ve srovnání s referenčním palivem D100, činí -35 %. Z uvedeného grafu je patrné, že uvedené směrodatné odchylky jsou výrazně větší než samotné hodnoty tvorby C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O. Z tohoto důvodu není možné vyvodit žádný prokazatelný závěr.

### 5.1.6. Emise butadienu (C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>)

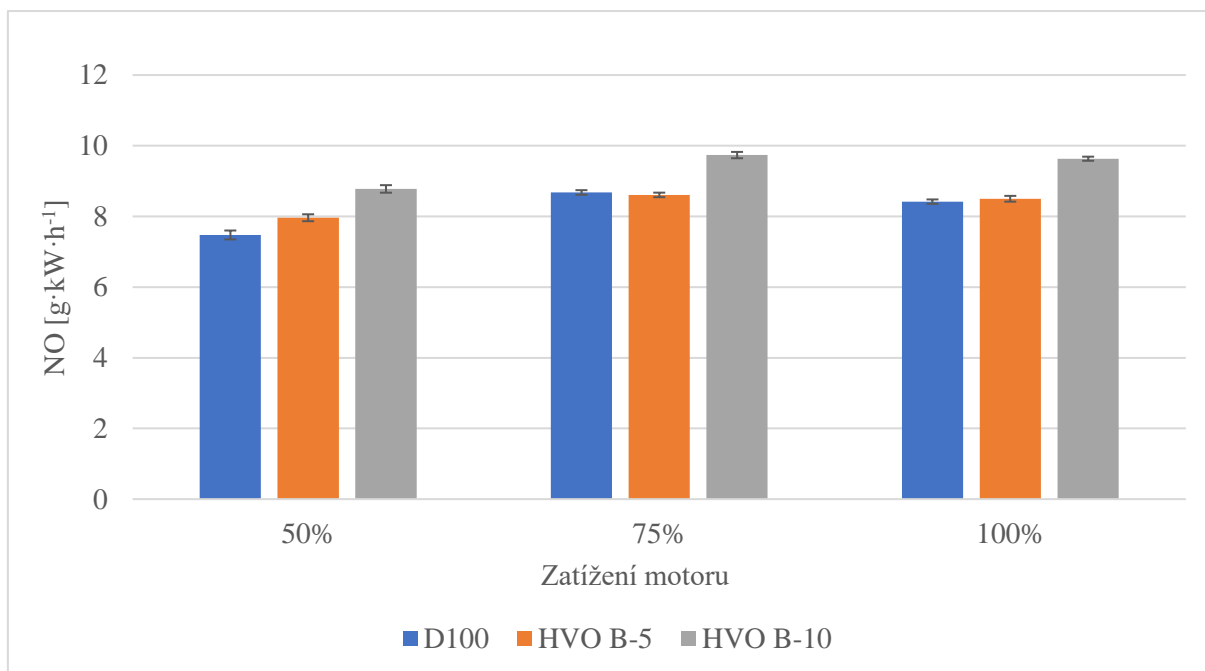


Graf 6 Emise C<sub>4</sub>H<sub>6</sub> při daném zatížení vznětového motoru

Graf č. 6 vyobrazuje množství produkovaných emisí butadienu (C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>) pro jednotlivá paliva, a to ve třech bodech měření při zatížení motoru na 50 %, 75 % a 100 %. Butadien je bezbarvý plyn o teplotě varu -4,4 °C, který byl Mezinárodní agenturou pro výzkum rakoviny zařazen mezi karcinogeny skupiny 2A. Z uvedeného grafu je patrný klesající trend produkce C<sub>4</sub>H<sub>6</sub> u všech použitých paliv, a to společně se zvyšujícím se zatížením motoru. Příčina tohoto postupného snižování emisí C<sub>4</sub>H<sub>6</sub> je s nejvyšší pravděpodobností dána zvyšující se teplotou spalování při vyšším zatížení motoru, jejímž následkem dochází ke zlepšení oxidační reakce. Při použití paliva HVO B-5 byly naměřeny snížené hodnoty produkce C<sub>4</sub>H<sub>6</sub> ve všech bodech měření. Nejvýznamnější procentuální rozdíl, ve srovnání s referenčním palivem D100, byl zaznamenán u 50% zatížení, a to pokles tvorby C<sub>4</sub>H<sub>6</sub> o -6,7 %. Celkový průměrný pokles tvorby C<sub>4</sub>H<sub>6</sub> u experimentálního paliva HVO B-5 činí -6,3 %. Naopak u experimentálního paliva HVO B-10 se ve všech bodech měření setkáváme s nárůstem tvorby C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>. Nejvýznamnější procentuální rozdíl, ve srovnání s referenčním palivem D100, byl zaznamenán u 100% zatížení motoru, kdy hodnota tvorby C<sub>4</sub>H<sub>6</sub> vzrostla o 9,4 %. Průměrný nárůst tvorby C<sub>4</sub>H<sub>6</sub> při použití experimentálního paliva HVO B-10 činí 7,9 %. Zvýšené množství produkce C<sub>4</sub>H<sub>6</sub> můžeme zaznamenat především u paliv obsahující alkoholy. Emise vznikajícího butadienu mohou být ovšem ovlivněny mnoha faktory. Těmi mohou být například již dříve zmiňovaná teplota spalování, odlišná hodnota cetanového čísla (ovlivňující dobu oxidační reakce) nebo také změna kin. viskozity paliva (u experimentálních paliv HVO B-5, HVO B-10 vyšší než u D100).



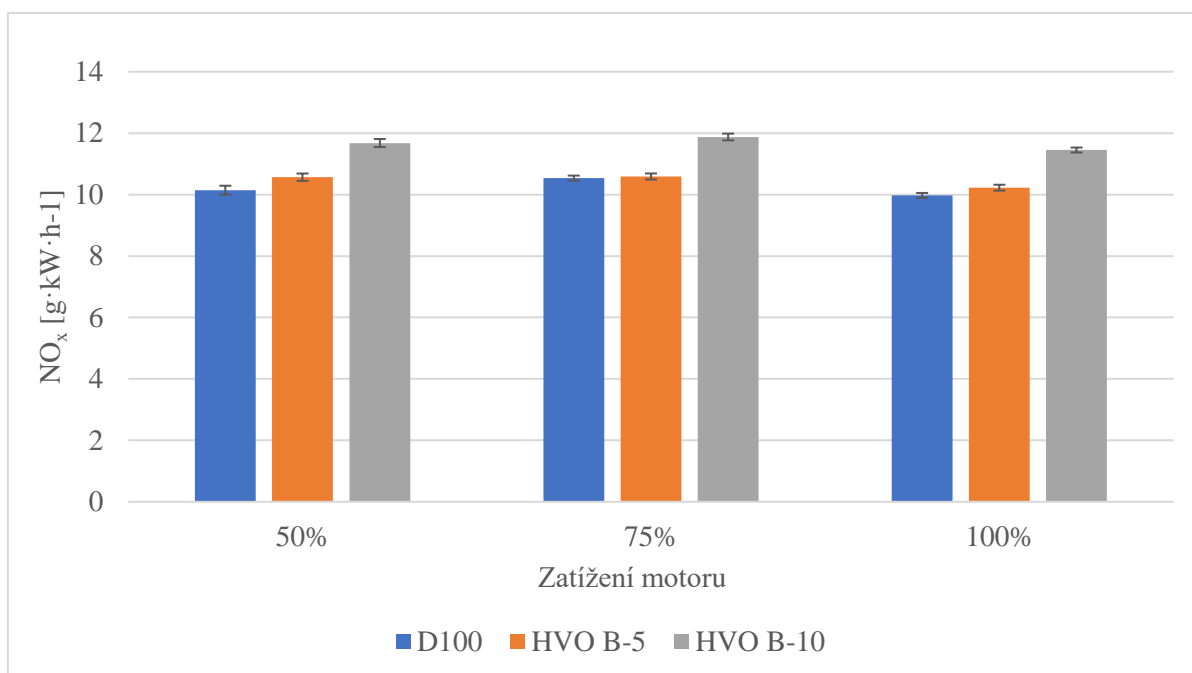
### 5.1.7. Emise oxidu dusnatého (NO)



Graf 7 Emise NO při daném zatížení vznětového motoru

Na grafu č. 7 jsou uvedena množství produkovaných emisí oxidu dusnatého pro jednotlivá paliva a zatížení motoru ve třech bodech (50 %, 70 %, 100 %). Oxid dusnatý je bezbarvý jedovatý plyn a je jedním z pěti oxidů dusíku. Oxidy dusíku (NO<sub>x</sub>) produkované vznětovými motory jsou tvořeny především plyny NO a NO<sub>2</sub>, přičemž jejich hlavní část je tvořena zmiňovaným oxidem dusnatým. Procentuálním zastoupením jednotlivých plynů NO<sub>x</sub> se budeme zabývat v následujících kapitolách. Z uvedeného grafu je patrný zvyšující se trend množství produkovaného NO s množstvím použitého HVO v experimentálních palivech. Ovšem v případě použitého paliva HVO B-5 se setkáváme s kolísavými hodnotami produkovaného NO ve srovnání s referenčním palivem, a to v rozsahu od -0,8 % u 75% zatížení do 6,51 % nárůstu v případě 50% zatížení. Experimentální palivo HVO B-10 vykazuje již výraznější nárůst hodnot produkovaného NO ve všech bodech měření ve srovnání s referenčním palivem, a to v rozsahu od 12 % při 75% zatížení do 17,4 % u 50% zatížení. Při použití HVO B-5 tedy nedochází k výraznému ovlivnění tvorby NO, namísto toho palivo HVO B-10 vykazuje zvýšenou tvorbu emisí zmiňovaného plynu. Možnou příčinou ovlivňující tvorbu NO může být například teplota spalování, jejíž zvýšená hodnota napomáhá oxidaci dusíku, který je přirozeně obsažen ve vzduchu a je nasáván do spalovacího prostoru. S čímž úzce souvisí taktéž samotné množství nasávaného vzduchu a obsah kyslíku v jednotlivých palivech. Dalšími ovlivňujícími faktory mohou být také množství spotřebovávaného paliva a doba, při které dochází k samotné oxidaci dusíku ve spalovacím prostoru.

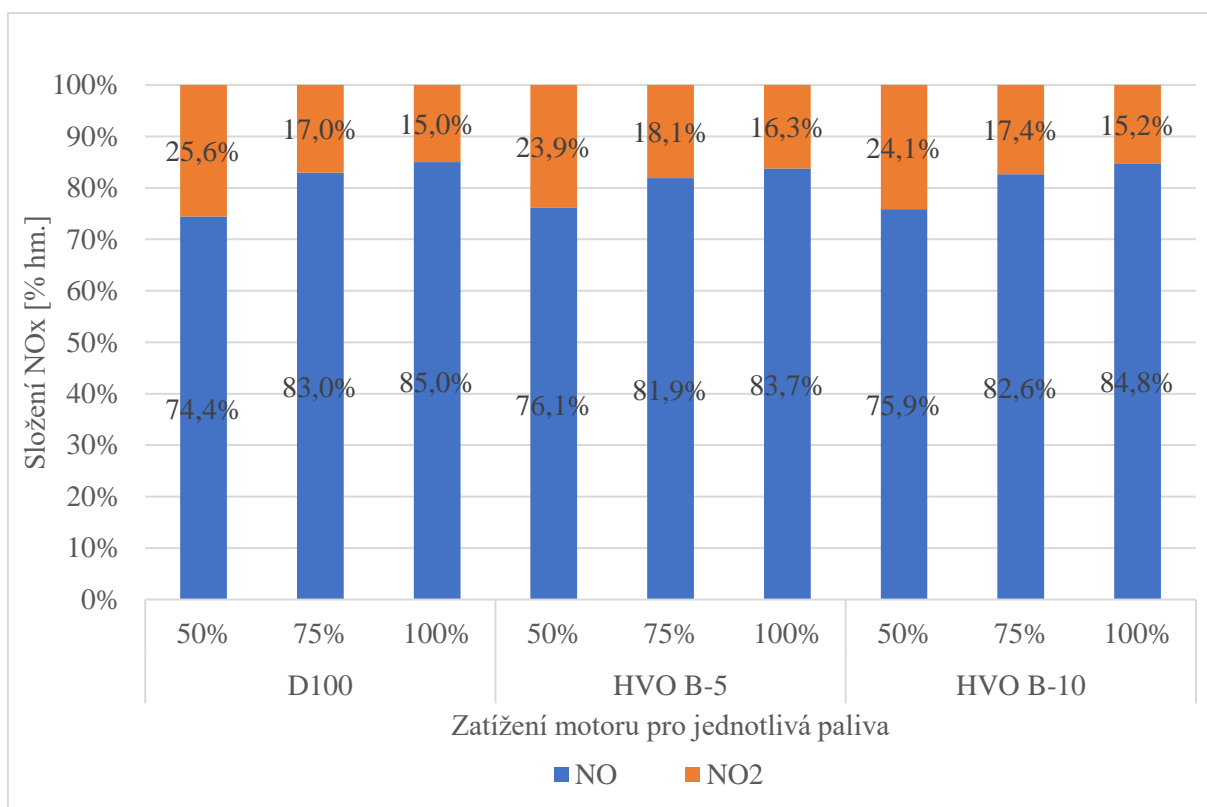
### 5.1.8. Emise oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>)



Graf 8 Emise NO<sub>x</sub> při daném zatížení vznětového motoru

Graf č. 8 vyobrazuje množství vznikajících emisí oxidů dusíku, při použití jednotlivých testovaných paliv a daném zatížení motoru (50 %, 75 %, 100 %). NO<sub>x</sub> je souhrnné označení pro jednotlivé oxidy dusíku (N<sub>2</sub>O, NO, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), v našem případě se ovšem budeme zabývat pouze množstvím plynů NO<sub>2</sub> a NO, které tvoří hlavní část vzniklých emisí NO<sub>x</sub>. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, největší část NO<sub>x</sub> je tvořena jedovatým oxidem dusnatým (NO). Zbylá část produkce NO<sub>x</sub> je tvořena oxidem dusičitým o teplotě varu 21,2 °C. Jedná se o agresivní, jedovatý plyn červenohnědé barvy, který vzniká oxidací vzdušného dusíku v průběhu spalování motorového paliva. NO<sub>x</sub> jsou společně s oxidem siřičitým hlavními plyny podílejícími se na vzniku kyselých dešťů. Vdechování vyšších koncentrací NO<sub>x</sub> lze označit za velmi rizikové, a to z důvodu tvorby kyseliny dusičné (HNO<sub>3</sub>) na sliznicích a taktéž možnosti negativního ovlivnění nervového systému. Na uvedeném grafu lze pozorovat, že množství produkce NO<sub>x</sub> se v průběhu jednotlivých zatížení téměř nemění, ovšem s množstvím použitého HVO v experimentálních palivech dochází ke zvýšení emisí NO<sub>x</sub>. V případě experimentálního paliva HVO B-5 byl zaznamenán průměrný nárůst tvorby NO<sub>x</sub> o 2,4 %. U experimentálního paliva HVO B-10 byl v porovnání s referenčním palivem D100 zaznamenán taktéž průměrný nárůst produkce NO<sub>x</sub>, ovšem v tomto případě již o 14,2 %. Možné příčiny zvýšené produkce NO<sub>x</sub> u experimentálních paliv lze přisuzovat například odlišné teplotě spalování, množství nasávaného vzduchu do prostoru válce nebo také době, při které dochází k samotné oxidaci dusíku v průběhu spalování vlivem odlišného cetanového čísla.

### 5.1.9. Zastoupení plynů NO a NO<sub>2</sub> v emisích NO<sub>x</sub>

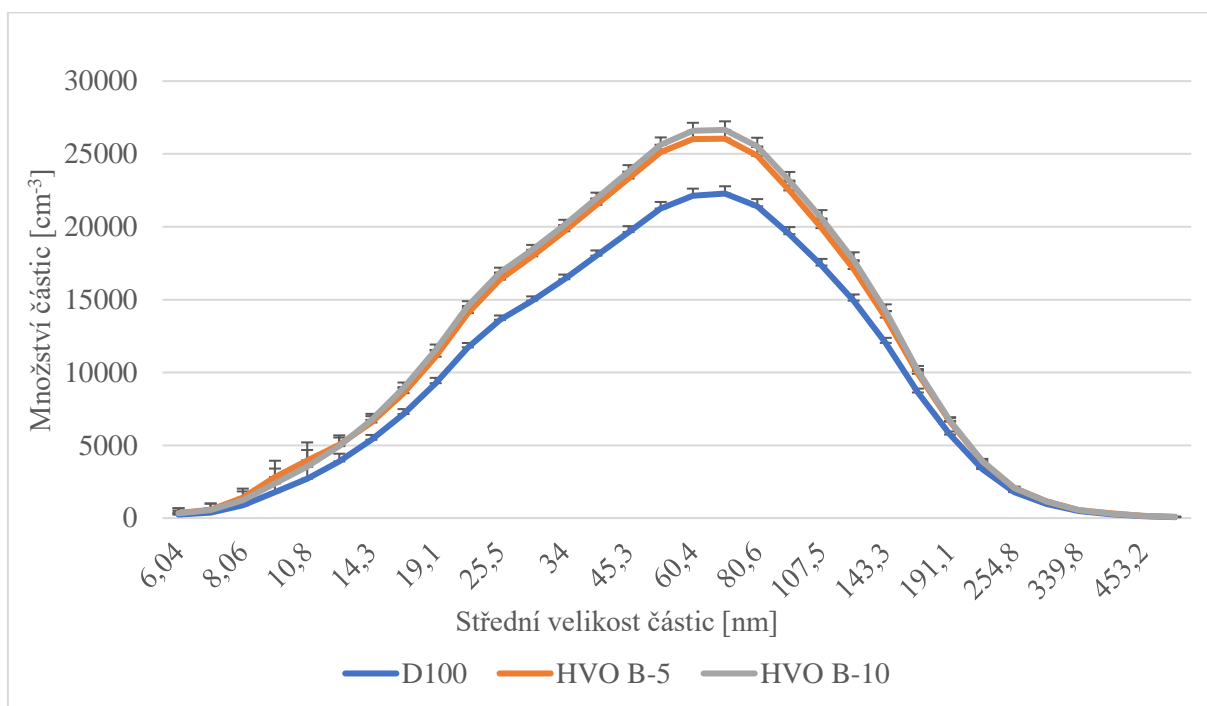


Graf 9 Procentuální zastoupení plynů NO a NO<sub>2</sub> ve vzniklých emisích NO<sub>x</sub>

V uvedeném grafu č. 9 lze vidět jednotlivá procentuální zastoupení plynů NO a NO<sub>2</sub>, která tvoří hlavní část oxidů dusíku produkovaných vznětovými motory. Z grafu je patrné, že hlavní částí produkce NO<sub>x</sub> je tvořena oxidem dusnatým (NO), jehož procentuální zastoupení se pohybuje v rozsahu od 74,4 % v případě 50% zatížení u referenčního paliva D100 do 85 % při 100% zatížení u téhož použitého paliva. Zbývá část tvorby NO<sub>x</sub> je v našem případě tvořena oxidem dusičitým (NO<sub>2</sub>), který se pohybuje v rozsahu od 15,2 % u 100% zatížení motoru při použití paliva HVO B-10 do 25,6 % při 50% zatížení u referenčního paliva D100. Z předchozího grafu č. 8 je patrné, že při použití experimentálních paliv HVO B-5 a HVO B-10 došlo při všech měřených zatížení motoru ke zvýšení produkce NO<sub>x</sub>. Z grafu č. 9 je ovšem patrné, že podíl jednotlivých plynů tvořících NO<sub>x</sub>, je při daných zatíženích u použitých experimentálních paliv téměř shodný s hodnotami, které byly naměřeny u referenčního paliva D100.

Dříve uvedené grafy (graf č. 7, graf č. 8) tedy prokazují nárůst tvorby emisí NO<sub>x</sub> u testovaných paliv HVO B-5 a HVO B-10, ve srovnání s referenčním palivem D100 ovšem nedochází k nikterak významnému ovlivnění podílu plynů (NO, NO<sub>2</sub>) tvořících celkové emise NO<sub>x</sub>.

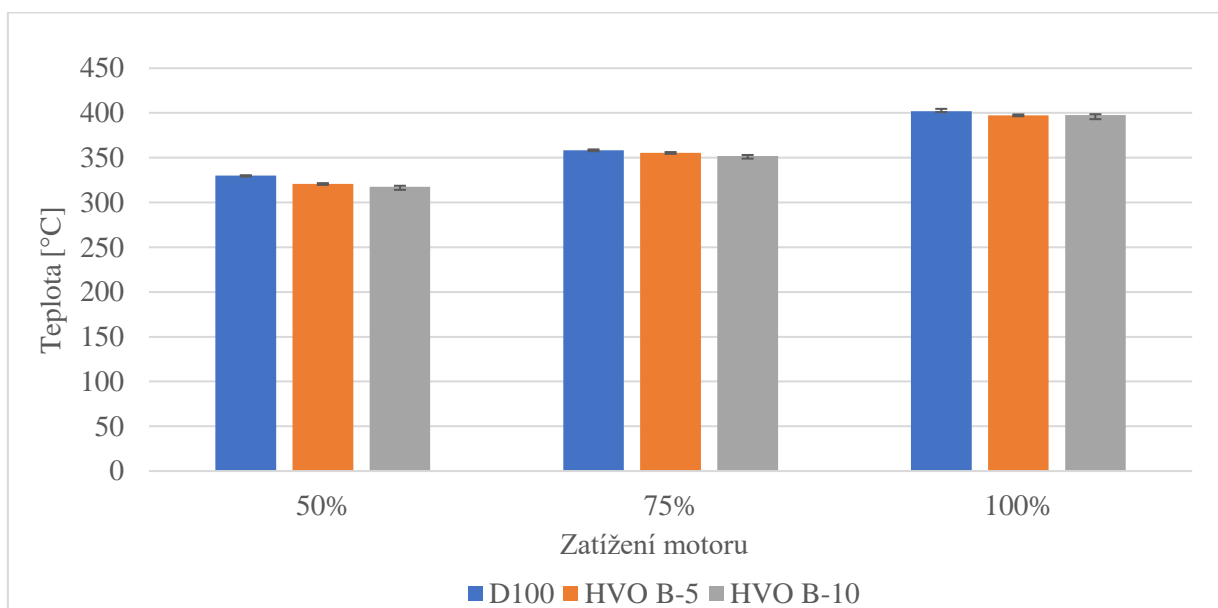
## 5.2. Pevné částice ve výfukových plynech



Graf 10 Množství a střední velikost vznikajících pevných částic

Na grafu č. 10 jsou vyobrazeny křivky pro jednotlivá použitá paliva zobrazující střední velikost a množství vznikajících pevných částic. Z uvedeného grafu je patrné, že při použití experimentálních paliv (HVO B-5, HVO B-10) došlo ke zvýšení produkce pevných částic. Tvarová shodnost jednotlivých křivek ovšem dokazuje, že použitím experimentálních paliv nedošlo k nikterak významnému ovlivnění střední velikosti částic, ale pouze ke zvýšení množství těchto částic, a to v celém měřeném rozsahu. Samotný vznik pevných částic je produktem nedokonalého spalování, které je způsobeno například nedostatečnou homogenitou směsi paliva a vzduchu nebo také použitím paliva obsahujícího nežádoucí zbytky ropy. V našem případě jsou zvýšené hodnoty tvorby pevných částí pravděpodobně způsobeny především vyšší viskozitou použitého HVO. Změna viskozity u experimentálních paliv se výrazně podílí na rozptýlování palivové směsi vstřikovacím ventilem. V případě viskóznějšího paliva lze předpokládat, že vstřikované palivo není dostatečně jemně rozptýleno a nedochází tak k dokonalému odhoření palivové kapky ve spalovacím prostoru. Důležitým faktorem je také velikost vznikajících pevných částic, jelikož se snižující se velikostí těchto částic roste ochota organismů tyto částice vstřebávat. Některé částice mohou být z organismu odstraněny během čištění plicních sklípků, ovšem některé mohou snadno proniknout až do krevního oběhu. V současné době lze pozorovat zvyšující se hodnoty tvorby pevných částic také u zážehových motorů, využívajících přímého vstřiku paliva do spalovacího prostoru.

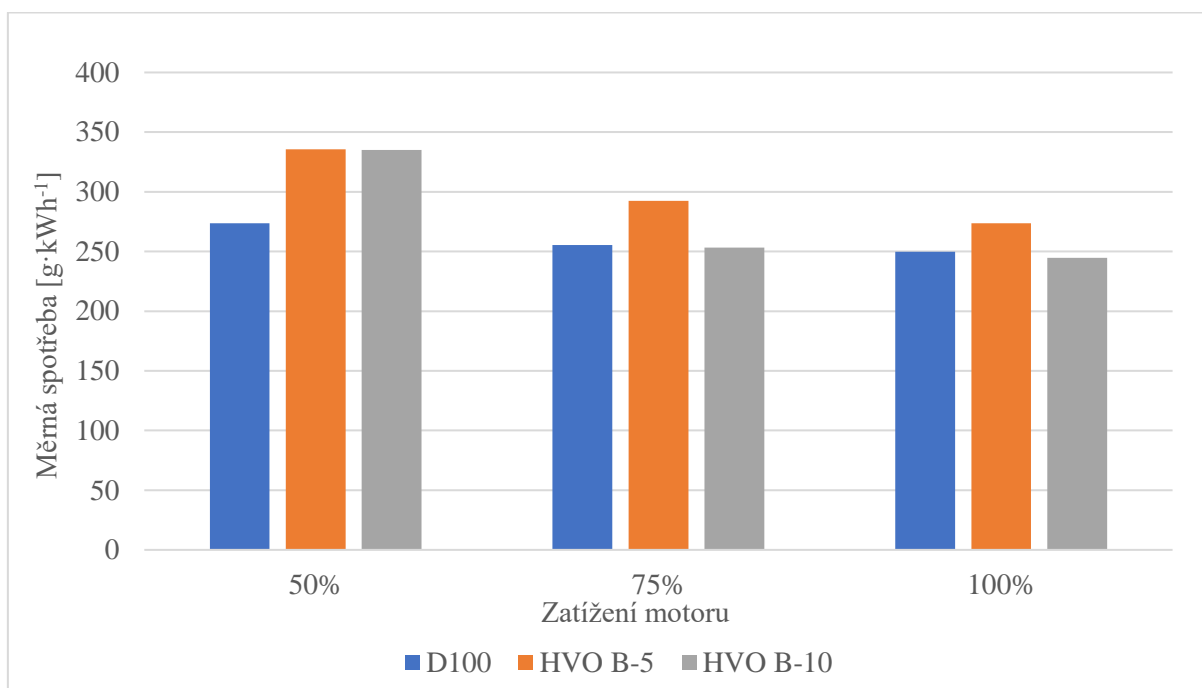
### 5.3. Teplota výfukových plynů



Graf 11 Teploty výfukových plynů při daném zatížení motoru

V uvedeném grafu č. 11 jsou vyobrazeny teploty výfukových plynů v závislosti na typu použitého paliva a daném zatížení motoru (50 %, 75 %, 100 %). Zaznamenané hodnoty byly měřeny za pomoci termočlánku typu K, který byl umístěn do tlumiče výfukového potrubí. Z grafu je patrný klesající trend teploty výfukových plynů s množstvím použitého HVO v experimentálních palivech. Nejvýraznější procentuální změna teploty spalin ve srovnání s referenčním palivem D100 činila 3,7 % u použitého paliva HVO B-10 při 50% zatížení motoru. Naopak nejnižší procentuální změna byla zaznamenána u testovaného paliva HVO B-5 při 75% zatížení motoru. Průměrný pokles teplot výfukových plynů u experimentálních paliv HVO B-5 a HVO B-10 činil -1,6 %, respektive -2,2 %. Teplota výfukových plynů významně souvisí s teplotou hoření palivové směsi ve spalovacím prostoru a podílí se na množství a typu vznikajících emisních plynů. Možnou příčinou mírně klesajících teplot u experimentálních paliv může být například vyšší cetanové číslo použitého HVO, jehož následkem dochází ke vznícení paliva dříve než u paliva s nižším cetanovým číslem. Tímto brzkým zapálením paliva může docházet k většímu přenosu vzniklého tepla do stěn válce a pístu, jehož následkem je do výfukového potrubí odváděn chladnější plyn, nežli je tomu v případě referenčního paliva D100. Na změnách teplot výfukových plynů se může taktéž podílet samotná výhřevnost použitého paliva a jeho hustota. Ačkoliv výhřevnost HVO použitého v experimentálních palivech je vyšší než v případě referenčního paliva, naopak jeho hustota je nižší, následkem čehož je do spalovacího prostoru palivovým čerpadlem dávkováno menší hmotnostní množství paliva nežli u D100. Tato skutečnost se odráží v celkovém množství vznikajícího tepla v průběhu spalování.

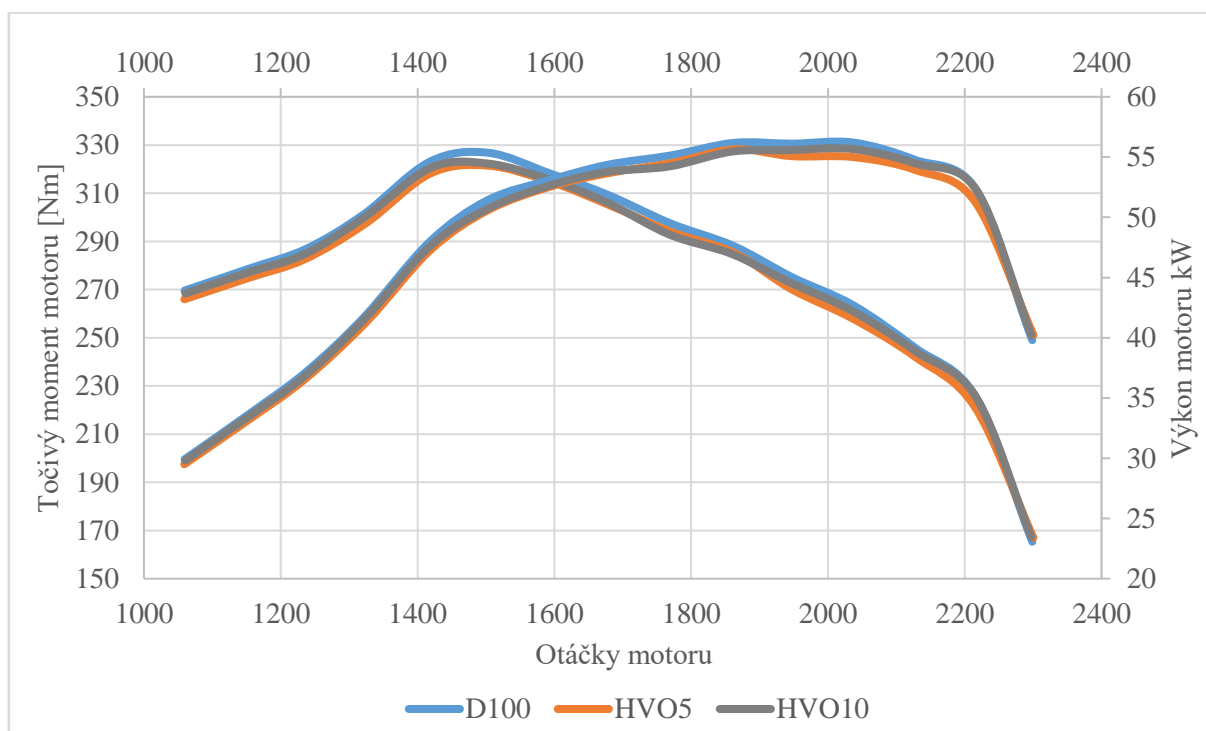
## 5.4. Měrná spotřeba paliva



Graf 12 Měrná spotřeba jednotlivých paliv při daném zatížení motoru

Na uvedeném grafu č. 12 je zobrazena měrná spotřeba jednotlivých použitých paliv v závislosti na daném zatížení motoru (50 %, 75 %, 100 %). Z grafu je patrný klesající trend měrné spotřeby paliva společně se vzrůstajícím zatížením motoru, a to u všech použitých paliv. U použitých experimentálních paliv (HVO B-5, HVO B-10) lze zaznamenat zvýšené hodnoty spotřeby paliva. S nejvýraznější procentuální změnou u paliva HVO B-5 v porovnání s referenčním palivem D100 se setkáme v oblasti 50% zatížení motoru, kdy spotřeba paliva vzrostla o 22,7 %. Taktéž u zatížení motoru na 75 % a 100 % se setkáváme s nárůstem spotřeby paliva, a to o 14,4 % respektive 9,6 %. Průměrný nárůst spotřeby experimentálního paliva HVO B-10 činí 15,5 %. Použitím experimentálního paliva HVO B-10 došlo taktéž ke zvýšení spotřebovávaného paliva, a to průměrně o 6 %. Nicméně výrazně zvýšenou hodnotu nalezneme pouze v případě 50% zatížení motoru, kdy tento nárůst činí 22,5 %. U zbylých zatížení motoru ovšem můžeme pozorovat pokles měrné spotřeby paliva, a to u 75% zatížení motoru o 0,9 % a při 100% zatížení motoru o 1,9 %. Změny hodnot měrné spotřeby u experimentálních paliv mohou být ovlivněny několika faktory. Jako jeden z hlavních faktorů lze uvést vyšší výhřevnost použitého HVO, která se projevuje sníženým množstvím spotřebovávaného paliva. U testovaných paliv HVO B-5 a HVO B-10 se ovšem taktéž setkáváme se zhoršenou účinností motoru, která se významně podílí na výsledné hodnotě měrné spotřeby paliva.

## 5.5. Točivý moment a výkon motoru



Graf 13 Otáčková charakteristika motoru při použití jednotlivých paliv

V uvedeném grafu č. 13 jsou vyobrazeny průběhy točivého momentu a výkonu motoru pro jednotlivá testovaná paliva. Z grafu je patrné, že průběh křivek HVO B-5 a HVO B-10 se liší jen velmi málo od křivky referenčního paliva D100. Průměrný pokles výkonu a točivého momentu experimentálního paliva HVO B-5, v porovnání s D100, činí -1,2 % respektive -1,3 %. Maximální procentuální rozdíl byl zaznamenán při 2037 ot·min<sup>-1</sup>, kdy výkon i moment motoru poklesl o -2,3 %. U experimentálního paliva HVO B-10 byl naměřen průměrný pokles výkonu a točivého momentu pouze -0,7 % respektive -0,6 %. U použitého experimentálního paliva HVO B-10 byl maximální zaznamenaný pokles výkonu a točivého momentu zjištěn při 1678 ot·min<sup>-1</sup>, kdy tento rozdíl činil 1,6 %. Výkon a točivý moment motoru je ovlivněn především výhřevností paliva a taktéž jeho hustotou. Vlivem nízké hustoty použitého HVO je snížena taktéž hustota experimentálních paliv HVO B-5 a HVO B-10. Z tohoto důvodu není do spalovacího prostoru dodáváno stejné hmotnostní množství paliva, jako v případě D100. Naopak zvýšená hodnota výhřevnosti, díky použití HVO, se pravděpodobně podílí na kompenzaci negativních vlivů způsobených nižší hustotou těchto paliv a nedochází tak k nikterak významnému poklesu výkonu a točivého momentu.

## 6. Závěr

Hlavním cílem této práce bylo určit do jaké míry jsou ovlivněny provozní parametry vznětového motoru, při použití směsí hydrogenovaného rostlinného oleje a motorové nafty. V současné době je problematika závislosti na fosilních palivech společně s nadměrnou produkcí skleníkových plynů velmi aktuálním tématem, přičemž jejich částečným řešením mohou být alternativní paliva. Nejčastěji používaným alternativním palivem pro vznětové motory na území ČR jsou již řadu let metylestery rostlinných olejů. Tato biopaliva ovšem nejsou jedinou možnou variantou nahrazení konvenčně používané motorové nafty. Ačkoli je celkový přínos používání metylesterů rostlinných olejů nemalý, doposud nalezneme řadu vlastností, které lze u těchto biopaliv označit jako nevyhovující.

V rámci ověření vlivu experimentálních paliv na provozní parametry vznětového motoru, bylo provedeno měření ve zkušebně Katedry jakosti a spolehlivosti strojů v prostorách České zemědělské univerzity. Testovaným strojem byl traktor Zetor Forterra 8641 a pro jeho pohon byla použita experimentální paliva obsahující motorovou naftu a hydrogenovaný rostlinný olej. Tato paliva jsou označována jako HVO B-5 tvořena 95 % čistou motorovou naftou bez obsahu biosložek a 5 % hydrogenovaným oleje a HVO B-10 tvořena 90 % čistou motorovou naftou a 10 % hydrogenovaným rostlinným olejem. Zjištěné provozní parametry byly následně srovnávány s parametry referenčního paliva čisté motorové nafty. Testované palivové směsi tak byly svým objemovým poměrem motorové nafty a přidané biosložky podobné palivům, které nalezneme u čerpacích stanic.

V rešeršní části této práce nalezneme historii vznětových motorů, popis jejich pracovních cyklů a taktéž princip fungování těchto motorů. Pozornost byla taktéž věnována emisím výfukových plynů vznikajících u vznětových motorů a možnostem jejich snižování. Hlavní část literární rešerše je věnována podrobnému popisu motorové nafty a biopaliv, a to zejména hydrogenovaným rostlinným olejům a jejich chemické podstatě ve srovnání s metylestery řepkového oleje.

V praktické části práce jsou vzájemně porovnávány a hodnoceny vlivy jednotlivých paliv na provozní parametry, kterými jsou zejména produkce  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$ ,  $\text{C}_4\text{H}_6$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_x$ . Dalšími hodnocenými parametry jsou množství a velikost vznikajících pevných částic, teplota výfukových plynů, měrná spotřeba paliva a dále točivý moment a výkon motoru. Měření těchto parametrů probíhalo ve třech bodech, a to při zatížení motoru dynamometrem na 50 %, 75 % a 100 %.



Z naměřených hodnot je patrné, že u experimentálních paliv HVO B-5 a HVO B-10 došlo ke zvýšení produkce CO<sub>2</sub>, a to zejména v případě paliva obsahujícího 10 % přidaného HVO, kde průměrná hodnota tvorby vzrostla o 13,8 %. Ovšem u požitého paliva s obsahem 5 % přidaného HVO tento průměrný nárůst činil pouhých 1,1 %. Naopak tvorba CO prokazuje kolísavé hodnoty, u kterých lze pozorovat pokles tvorby CO při 50% zatížení u obou testovaných paliv a následně její postupné zvyšování u 75% a 100% zatížení motoru. Změny tvorby CO<sub>2</sub> a CO mohou být způsobeny například zhoršenou účinností motoru nebo odlišným množstvím uhlíku obsaženém v hydrogenovaném rostlinném oleji.

Na základě množství produkce jednotlivých typů uhlovodíků lze konstatovat, že testované palivo HVO B-5 vykazuje příznivý vliv na jejich tvorbu. U většiny těchto uhlovodíků se setkáme s klesající hodnou jejich tvorby nebo hodnotou, která je velmi podobná referenčnímu palivu, motorové naftě. Namísto toho testované palivo HVO B-10 vykazuje ve srovnání s motorovou naftou shodné nebo ve většině případů zvýšené množství produkce těchto uhlovodíků.

Ačkoli se teplota výfukových plynů se zvyšujícím se podílem HVO v experimentálních palivech snižuje, u obou experimentálních paliv zaznamenáme zvýšené emise NO<sub>x</sub>. Stejně jako v předchozích případech se toto zvýšení týká především paliva obsahující 10 % přidaného hydrogenovaného rostlinného oleje, tedy HVO B-10. Zvýšenou tvorbu emisí NO<sub>x</sub> lze přisuzovat například vyššímu cetanovému číslu testovaných paliv ovlivňující dobu a průběh hoření. Dle předpokladu došlo také k mírnému zvýšení množství produkovaných pevných částic, a to téměř shodně u obou testovaných paliv. Pravděpodobnou příčinou tohoto nárůstu je zvýšená viskozita experimentálních paliv, která zásadně ovlivňuje rozptýlování palivové směsi vstříkovacím ventilem. Velmi kladně lze ovšem hodnotit průběh točivého momentu a výkonu motoru, který v porovnání s referenčním palivem téměř nezměnil. Vlivem zhoršené účinnosti motoru pravděpodobně došlo k zvýšení měrné spotřeby testovaných paliv.

Na základě zmiňovaných výsledků lze hydrogenované rostlinné oleje hodnotit jako vhodné pro použití ve směsích s čistou motorovou naftou. Z testovaných paliv lze vyzdvihnout především palivo HVO B-5. Použitím tohoto paliva došlo pouze k nepatrným změnám provozních parametrů, na rozdíl od experimentálního paliva HVO B-10, které ovlivňuje spalovací proces prokazatelně více. Mnoho výhod hydrogenovaných rostlinných olejů, v porovnání s používanými metylestery rostlinných olejů, je dáno především jejich chemickou podstatou. Díky své uhlovodíkové povaze a nulovému zastoupení kyslíku mají tato paliva výrazně lepší oxidační stabilitu, vysoké cetanové číslo, nízkou produkci NO<sub>x</sub> a jsou materiálově

kompatibilní s palivovým systémem. Tento druh biopaliva eliminuje doposud nechvalně známe vlastnosti metylesterů rostlinných olejů a je vhodnou a udržitelnou cestou vedoucí k postupnému snižování závislosti na ropných palivech.

## 7. Seznam citovaných zdrojů

- [1] HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [2] FERENC, Bohumil. *Spalovací motory: karburátory, vstřikování paliva a optimalizace parametrů motoru*. Vyd. 3. Brno: Computer Press, 2009. Auto-moto-profi (Computer Press). ISBN 978-80-251-2545-8.
- [3] REMEK, Branko. *Automobil a spalovací motor: historický vývoj*. 1. vyd. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-3538-2.
- [4] ARMSTRONG, Lloyd a Lloyd PROCTOR. Diesel engine: compression-ignition engine. *Encyclopædia Britannica* [online]. 2019 [cit. 2020-10-11]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/diesel-engine>
- [5] Difference Between Petrol And Diesel Engine. *Universal Science Compendium* [online]. 2018 [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: <http://usciencecompendium.blogspot.com/2014/03/difference-between-petrol-and-diesel.html>
- [6] RAUSCHER, Jaroslav. *Spalovací motory*. Brno, 2005. Studijní opory VUT v Brně. Vysoké učení technické v Brně.
- [7] MACOUN, David. *Moderní trendy v oblasti přepřínování spalovacích motorů*. Praha, 2019. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce Ing. Martin Kotek, Ph.D.
- [8] *Technical specifications: Skoda - Octavia I Combi Tour - 1.9 TDI (110 Hp)* [online]. [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: <https://www.auto-data.net/en/skoda-octavia-i-combi-tour-1.9-tdi-110hp-14262>
- [9] ŠMERDA, Tomáš, Jiří ČUPERA a Martin FAJMAN. *Vznětové motory vozidel: biopaliva, emise, traktory*. 1. vyd. Brno: CPress, 2013. Auto-moto-profi (CPress). ISBN 978-80-264-0160-5.
- [10] *Unipetrol RPA* [online]. [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: <https://www.orlenunipetrolrpa.cz/CS/Stranky/default.aspx>
- [11] MATĚJOVSKÝ, Vladimír. *Automobilová paliva*. 1. vyd. Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-0350-5.
- [12] HÖNIG, Vladimír. *Nafta. Presentace č. 3 předmětu Paliva a maziva, kód předmětu: ACT01E*. Praha: ČZU, 2015.

- [13] ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA. ČSN EN 590+A1 (656506): Motorová paliva - Motorové nafty - Technické požadavky a metody zkoušení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2018.
- [14] ABURUDYNA, A., Dimitrios KARONIS a Lois EVRIPIDIS. Impact of Biodiesel Addition on Distillation Characteristics and Cetane Index of Diesel Fuels. *Journal of Energy Engineering* [online]. **2015**, 141 [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000244
- [15] HÁBA, Richard. *Vliv aditiv v motorové naftě na produkci emisí vznětového motoru*. Praha, 2019. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Jakub Mařík, Ph.D.
- [16] VÍŠEK, Lubor a Michal POKORNÝ. Výroba esterů mastných kyselin (bionafty) z odpadních tuků. *Chemické listy*. Rybitví, 2012, **2013**(107), 476-478.
- [17] HÖNIG, Vladimír. *Technicko-ekonomické parametry biopaliv pro aplikace ve spalovacích motorech*. Praha, 2009. Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Boleslav KADLEČEK, CSc.
- [18] HÖNIG, Vladimír. *Paliva a maziva*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2013. ISBN 978-80-213-2432-9.
- [19] ČSN EN 590: Motorová paliva – Motorové nafty – Technické požadavky a metody zkoušení (únor 2018).
- [20] MATZNER, Bc. *Vliv biopaliv na provozní parametry spalovacích motorů*. Praha, 2018. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce Ing. Jakub Mařík, Ph.D.
- [21] ŠIMÁČEK, Pavel, Dan VRTIŠKA, Zlata MUŽÍKOVÁ a Milan POSPÍŠIL. Motorová paliva vyráběná hydrogenací rostlinných olejů a tuků. *Chemické listy*. Vysoká škola chemickotechnologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha 6, 2017, **111**(3), 177-232. ISSN 1213-7103.
- [22] ČSN EN 14214+A2: Motorová paliva - Methylestery mastných kyselin (FAME) pro vznětové motory – Technické požadavky a metody zkoušení (červenec 2014).
- [23] ŠIMÁČEK, Pavel, David KUBIČKA, Gustav ŠEBOR a Milan POSPÍŠIL. Hydroprocessed rapeseed oil as a source of hydrocarbon-based biodiesel. *Fuel* [online]. 2009, **2009**(88), 456-460 [cit. 2021-01-28]. ISSN 0016-2361. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623610800416X>

- [24] SATYARTHI, J., T. CHIRANJEEVI, D. GOKAK a P. VISWANATHAN. An overview of catalytic conversion of vegetable oils/fats into middle distillates. *Catal. Sci. Technol* [online]. 2013, **3**(1), 70-80 [cit. 2021-01-28]. ISSN 2044-4753. Dostupné z: doi:10.1039/C2CY20415K
- [25] TOBA, Makoto, Yohko ABE, Hidetoshi KURAMOCHI a Masahiro OSAKO. Hydrodeoxygenation of waste vegetable oil over sulfide catalysts. *Catalysis Today* [online]. 2011, **2011**(164), 533-537 [cit. 2021-01-28]. ISSN 0920-5861. Dostupné z: doi:10.1016
- [26] STUMBORK, Mark, AI WONG a Ad HOGEN. Hydroprocessed vegetable oils for diesel fuel improvement. *Bioresource Technology* [online]. 1996, **1996**(56), 13-18 [cit. 2021-01-28]. ISSN 0960-8524. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0960852495001816>
- [27] HANCSÓK, Jenő, Márton KRÁR, Szabolcs MAGYAR, László BODA, András HOLLÓ a Dénes KALLÓ. Investigation of the production of high cetane number bio gas oil from pre-hydrogenated vegetable oils over Pt/HZSM-22/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Microporous and Mesoporous Materials* [online]. 2007, **2007**(101), 148-152 [cit. 2021-01-28].
- [28] *Neste* [online]. Espoo, 2021 [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: <https://www.neste.com/en>
- [29] *OMV.cz: MaxxMotion Diesel* [online]. Česká republika, 2021 [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: <https://www.omv.cz/cs-cz/maxxmotion-diesel>
- [30] AATOLA, Hannu, Martti LARMI a Seppo MIKKONEN. *Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel: SAE Technical paper 2008-01-2500* [online]. 2008 [cit. 2021-01-28].
- [31] *BIOFUEL EXPRESS* [online]. [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: <https://www.biofuel-express.com/en/nestemy/>
- [32] MATRIX-MG5 Gas Analyzer Bruker. In: *Bruker* [online]. 2021 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/infrared-and-raman/gas-analysis/matrix-mg5-gas-analyzer.html>
- [33] Částicový analyzátor TSI EEPS 3090. In: *Katedra vozidel a pozemní dopravy* [online]. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2021 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://katedry.czu.cz/kvpd/merici-vybaveni/emise?editmode=0>

## 8. Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma přeměny energie u spalovacích motorů [1] .....	2
Obr. 2 Základní fáze čtyřdobého vznětového motoru [5] .....	5
Obr. 3 Porovnávací a indikátorový Sabateův diagram vznětového motoru [6] .....	5
Obr. 4 Princip funkce turbodmychadla [1] .....	9
Obr. 5 Složení výfukových plynů u zážehového a vznětového motoru [1] .....	11
Obr. 6 Destilační křivka motorové nafty [14] .....	18
Obr. 7 Zastoupení olejů a tuků využívaných pro výrobu bionafty v Evropě; data: [16].....	22
Obr. 8 Reesterifikace řepkového oleje [20].....	23
Obr. 9 Zjednodušené reakční schéma hydrogenace rostlinného oleje [23].....	27
Obr. 10 Hoření 100 % HVO (vlevo) a ropné nafty (vpravo) [31].....	31
Obr. 11 Traktor Zetor Forterra 8641; Zdroj vlastní.....	34
Obr. 12 Emisní analyzátor Bruker MATRIX-MG5 [32].....	38
Obr. 13 Částicový analyzátor TSI EEPS 3090 [33] .....	39

## 9. Seznam tabulek

Tab. 1 Obecné požadavky na motorovou naftu ČSN EN 590+A1 [15] .....	20
Tab. 2 Vlastnosti m. nafty, bionafty a paliva vyrobeného hydrogenací r. o. [21].....	30
Tab. 3 Technická data motoru Zetor 1204 .....	36
Tab. 4 Technické parametry dynamometru .....	37
Tab. 5 Technické parametry emisního analyzátoru.....	38
Tab. 6 Technické parametry částicového analyzátoru.....	39
Tab. 7 Technické parametry laboratorní váhy .....	40
Tab. 8 Vlastnosti použitých směsných paliv .....	41

## 10. Seznam grafů

Graf 1 Emise CO <sub>2</sub> při daném zatížení vznětového motoru .....	43
Graf 2 Emise CO při daném zatížení vznětového motoru.....	44
Graf 3 Emise CH <sub>2</sub> O při daném zatížení vznětového motoru.....	45
Graf 4 Emise CH <sub>4</sub> při daném zatížení vznětového motoru .....	46
Graf 5 Emise C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O při daném zatížení vznětového motoru .....	47
Graf 6 Emise C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> při daném zatížení vznětového motoru .....	48
Graf 7 Emise NO při daném zatížení vznětového motoru.....	49
Graf 8 Emise NO <sub>x</sub> při daném zatížení vznětového motoru .....	50
Graf 9 Procentuální zastoupení plynů NO a NO <sub>2</sub> ve vzniklých emisích NO <sub>x</sub> .....	51
Graf 10 Množství a střední velikost vznikajících pevných částic .....	52
Graf 11 Teploty výfukových plynů při daném zatížení motoru .....	53
Graf 12 Měrná spotřeba jednotlivých paliv při daném zatížení motoru.....	54
Graf 13 Otáčková charakteristika motoru při použití jednotlivých paliv .....	55

## 11. Seznam použitých zkratk

AFME	– Methylestery živočišných tuků (Animal fats methylesters)
B30	– Motorová nafta obsahují 30 % biosložky
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	– Acetaldehyd
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	– Butadien
CFPP	– Teplota filtrovatelnosti (Cold Filter Plugging Point)
CO	– Oxid uhelnatý
CO <sub>2</sub>	– Oxid uhličitý
ČSN	– Česká technická norma
D100	– Čistá motorová nafta bez biosložek

DOC	– Oxidační katalyzátor (Diesel Oxidation Catalyst)
DPF	– Filtr pevných částic (Diesel Particulate Filter)
DÚ	– Dolní úvrat'
EGR	– Recirkulace výfukových plynů (Exhaust Gas Recirculation)
FAME	– Methylestery mastných kyselin (Fatty Acid Methyl Esters)
H <sub>2</sub>	– Vodík
H <sub>2</sub> O	– Voda
HNO <sub>3</sub>	– Kyselina dusičná
HÚ	– Horní úvrat'
HVO	– Hydrogenovaný rostlinný olej (Hydrotreated Vegetable Oil)
HVO B-10	– (90 obj. % motorové nafty + 10 obj. % hydrogenovaného oleje)
HVO B-5	– (95 obj. % motorové nafty + 5 obj. % hydrogenovaného oleje)
CH <sub>2</sub> O	– Formaldehyd
CH <sub>4</sub>	– Methan
KOH	– Hydroxid draselný
MEŘO	– Methylester řepkového oleje
N <sub>2</sub>	– Dusík
N <sub>2</sub> O	– Oxid dusný
NaOH	– Hydroxid sodný
NO <sub>2</sub>	– Oxid dusičitý
NO <sub>x</sub>	– Oxidy dusíku
O <sub>2</sub>	– Kyslík
PM	– Pevné částice (Particular Matter)
Ppm	– Počet částic na jeden milion (Parts per milion)



SF	– bezsírnatý (Solphur free)
SMN30	– Směsná motorová nafta obsahující 30 % MEŘO
SRC	– Redukční katalyzátor (Selective Catalytic Reduction)
% (m/m); % hm.	– Hmotnostní procento
% (V/V); obj. %	– Objemové procento