

Česká zemědělská univerzita v Praze
Technická fakulta

**Vliv biopaliva na provozní podmínky
vznětových spalovacích motorů**

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Autor práce: Bc. Adam Štěrbák

PRAHA 2019

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Adam Štěrbák

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Vliv biopaliv na provozní podmínky vznětových spalovacích motorů

Název anglicky

The influence of biofuels on the operating conditions of compression ignition engines

Cíle práce

Cílem diplomové práce je shrnout současný stav ve využívání biopaliv pro spalovací motory a zachytit další vývojové tendence v jejich používání. Podrobně rozebrat možnosti využívání biopaliv ve vznětových motorech. Provést porovnání výkonových parametrů, měrné spotřeby paliva, koncentrace plynných složek a pevných částic u vybraných druhů paliv a ve zvoleném spalovacím motoru.

Metodika

1. Úvod
2. Současný stav a vývojové tendence v používání biopaliv (biopaliva, spalovací motor, měření provozních parametrů)
3. Cíle práce
4. Metodika
5. Výsledky (měření provozních parametrů vybraného spalovacího motoru na různá biopaliva, zhodnocení naměřených dat)
6. Závěr

Doporučený rozsah práce

50-60

Klíčová slova

spalovací motor, biopaliva, spotřeba paliva, emise

Doporučené zdroje informací

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, – TAKÁTS, M. *Měření emisí spalovacích motorů*. PRAHA: ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01632-3.

FAJMAN, M. – ŠMERDA, T. – ČUPERA, J. *Vznětové motory vozidel : biopaliva, emise, traktory*. Brno: CPress, 2013. ISBN 978-80-264-0160-5.

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.

Předpisy, normy a periodika.

SHAH, Y T. – LEE, S. *Biofuels and bioenergy : processes and technologies*. Boca Raton: CRC Press, 2013. ISBN 978-1-4200-8955-4.

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů

Elektronicky schváleno dne 7. 12. 2017

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 1. 2018

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 12. 03. 2018

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Vliv biopaliva na provozní podmínky vznětových spalovacích motorů vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom že, na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze 19. března 2019

Adam Štěrbák

Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Martinu Pexovi, Ph.D., za cenné rady a trpělivost, kterou se mnou měl při vytváření této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat celému týmu, který se zabývá výzkumem biopaliv na Katedře jakosti a spolehlivosti strojů. Napsání této práce by se v žádném případě neobešlo bez neutuchající podpory celé rodiny. Chtěl bych především upřímně poděkovat svým rodičům, kteří mi byli v každé kritické chvíli oporou.

Abstrakt: Tato práce se podrobně zabývá problematikou použití biopaliv pro pohon vznětových spalovacích motorů. Konkrétně je zkoumán vliv použití alternativních směsí paliv obsahujících biosložky na provozní parametry těchto motorů. V první části práce je ve stručnosti shrnuta historie vznětových motorů a jsou zde popsány základní principy jejich činnosti. Pozornost je také věnována produkci emisí vznikajících při spalovacím procesu a možnostem redukce jejich emitování do atmosféry. V kapitole popisující paliva jsou představeny některé druhy kapalných biopaliv. V experimentální části práce jsou zkoumány konkrétní změny provozních parametrů motoru testovaného traktoru Zetor Forterra 8641 při použití paliva skládajícího se ze směsí motorové nafty s řepkovým, resp. slunečnicovým olejem a butanolem v různých poměrech zastoupení ve směsi. V závěru jsou získané výstupní hodnoty vzájemně porovnány a je vyhodnoceno, které z testovaných paliv je z pohledu ovlivnění výkonových parametrů, spotřeby paliva a produkce emisí nejvhodnější pro provoz vznětového motoru.

Klíčová slova: vznětový spalovací motor, biopalivo, výkonové parametry, spotřeba paliva, emise

The influence of biofuels on the operating conditions of compression ignition engines

Summary: The thesis presents a detailed analysis of the use of biofuels for internal combustion engines, focusing specifically on the impact of alternative fuel mixes containing bio components on the operational parameters of these engines. The first part of the thesis provides a brief summary of the history of internal combustion engines and explains the essential principles of their function. Attention is paid also to the production of emissions during the combustion process and to the possible ways of reducing these emissions. The chapter describing fuels presents some types of liquid biofuels. The experimental part of the thesis studies specific changes in operational parameters of the tested Zetor Forterra 8641 tractor engine with fuel consisting of a mix of diesel and rape or sunflower oil and butanol in different ratios of their percentage in the fuel mix. The obtained values are then compared against each other and the evaluation provides an overview which of the tested fuels is the most suitable one for the operation of an internal combustion engine in terms of impact on performance parameters, fuel consumption, and production of emissions.

Key words: compression ignition engine, biofuel, performance parameters, fuel consumption, emissions

Obsah

1	Úvod	1
2	Současný stav a vývojové tendence v používání biopaliv.....	3
2.1	Vznětový spalovací motor	3
2.1.1	Historie	3
2.1.2	Princip činnosti.....	4
2.1.2.1	Pracovní oběhy čtyřdobého motoru	4
2.1.2.2	p-V diagram pracovního oběhu.....	5
2.1.2.3	Tepelná bilance	6
2.1.3	Palivová soustava	7
2.1.3.1	Tvorba směsi	8
2.1.3.2	Systémy vstřikování paliva	8
2.1.4	Chemické emise spalovacího procesu	9
2.1.4.1	Složení výfukových plynů.....	9
2.1.4.2	Zařízení pro úpravu výfukových plynů	11
2.2	Kapalná paliva pro vznětové motory	12
2.2.1	Legislativa a její plnění.....	13
2.2.2	Vlastnosti paliv	15
2.2.3	Metylestery mastných kyselin rostlinného původu (FAME)	15
2.2.4	Motorová nafta B7.....	16
2.2.5	Směsná motorová nafta B30.....	16
2.2.6	Biopaliva.....	17
2.2.6.1	I. generace	18
2.2.6.2	II. generace	21
2.2.6.3	III. generace.....	23
2.3	Konstrukční úpravy vznětových motorů pro spalování biopaliv.....	24
2.4	Měření provozních vlastností	26

2.4.1	Měření výkonových parametrů.....	26
2.4.2	Měření spotřeby paliva	27
2.4.3	Měření emisí	27
2.4.3.1	Metody zjišťování koncentrace plyných složek.....	27
2.4.3.2	Metody měření emise částic ze vznětových motorů	29
3	Cíle práce.....	30
4	Metodika.....	31
4.1	Postup měření	31
4.2	Porovnávaná paliva a sledované parametry.....	35
4.3	Zařízení a přístroje použité při měření	35
5	Výsledky měření.....	40
5.1	Motorová nafta	40
5.2	Směs motorové nafty, řepkového oleje a butanolu v poměru 70/20/10	42
5.3	Směs motorové nafty, řepkového oleje a butanolu v poměru 60/20/20	43
5.4	Směs motorové nafty, slunečnicového oleje a butanolu v poměru 70/20/10	45
5.5	Směs motorové nafty, slunečnicového oleje a butanolu v poměru 60/20/20	46
5.6	Porovnání vlivu paliv na sledované parametry.....	49
5.6.1	Výkonové parametry motoru.....	49
5.6.2	Spotřeba paliva	51
5.6.3	Produkce emisí CO, CO ₂ , NO a PM.....	52
6	Ekonomické zhodnocení.....	55
7	Závěr.....	58
8	Použitá literatura.....	60
9	Slovník pojmů	64
10	Seznam obrázků.....	66
11	Seznam tabulek.....	67
12	Seznam příloh.....	68

1 Úvod

Již od začátku 20. století je automobilová doprava fenoménem a od svých počátků výrazně ovlivňuje vývoj moderní společnosti. S rostoucím počtem provozovaných motorových vozidel se nicméně objevují různé negativní aspekty jako jsou vyčerpávání nerostných zdrojů a emise škodlivých plynů, které jsou tématy veřejných diskuzí a iniciátory pro stanovování různých limitů a nařízení, kterými se musí výrobci automobilů, resp. pohonných hmot řídit. Tempo, se kterým jsou vydávány stále se zpřisňující emisní limity, nutí výrobce konstruovat stále modernější pohonné jednotky a implementovat do nich nové systémy pro úpravu výfukových plynů. Skutečnost je však taková, že na povrch vyplouvají skandály o podvodech s emisními testy týkající se zejména vznětových motorů. Tyto kauzy a následné omezení vjezdu do některých evropských měst v posledních letech negativně ovlivňují prodeje osobních automobilů využívající vznětové motory.

Z výše zmíněných důvodů se tedy dostávají do popředí zájmu alternativní paliva, s jejichž pomocí lze zredukovat produkci skleníkových a zdraví škodlivých plynů. Další faktorem hovořícím pro zavádění alternativních paliv je snižování závislosti na ropných produktech, ze kterých jsou vyráběna konvenční paliva. Jedním z druhů alternativních paliv jsou kapalná biopaliva získávaná z biomasy, která se svými parametry podobají běžné motorové naftě či benzinu. Velkou výhodou biopaliv je to, že již při pěstování rostlin, které jsou následně použity jako suroviny pro výrobu biopaliv, je spotřebováván oxid uhličitý, díky čemuž dochází na konci celého cyklu výroby a spotřeby biopaliva k určitému poklesu produkce oxidu uhličitého. Další výhodou je i potenciál úspory produkce škodlivých emisí při samotném spalování ve vznětových motorech.

V současné době je v České republice zákonem stanoveno, že za kalendářní rok jsou dodavatelé uvádějící motorovou naftu do volného daňového oběhu pro dopravní účely povinni, aby bylo nejméně 6 objemových % z celkového množství motorové nafty tvořeno biosložkou. Nejrozšířenější látkou běžně přimíchávanou do motorové nafty je na našem území metylester řepkového oleje. Z pohledu technologického pokroku by však nebylo dobré ustrnout ve vývoji a zůstat jen u používání konvenčních druhů kapalných biopaliv. Proto je snahou vědců a výzkumných pracovníků nalézt ideální druh biopaliva, který by mohl v co nejvyšší míře nahradit motorovou naftu a zároveň minimalizovat negativní dopady automobilové dopravy na životní prostředí.

Součástí této práce je stanovení vlivu použití experimentálních směsí skládajících se z motorové nafty, čistých rostlinných olejů a biobutanolu na provozní vlastnosti vznětového motoru. Zjišťovány jsou změny ve výkonových parametrech testovaného vozidla, změny v hodnotách spotřeby paliva a množství emitovaných složek škodlivých výfukových plynů v průběhu NRSC testu.

2 Současný stav a vývojové tendence v používání biopaliv

V této kapitole budou v první řadě rozebrány princip fungování a konstrukční specifika spalovacího vznětového motoru. Dále budou ve stručnosti popsány jednotlivé součásti palivového ústrojí a nežádoucí chemické emise, které jsou produktem nedokonalého spalování paliva. Následně bude věnována pozornost kapalným palivům používaným ve vznětových motorech a zejména pak možnostem nahrazení motorové nafty biopalivy. V závěru budou shrnuty měřicí metody sloužící ke stanovování provozních vlastností spalovacích motorů.

2.1 Vznětový spalovací motor

Vznětové motory mají široké uplatnění v různých odvětvích od průmyslu přes stavebnictví, zemědělství až po lodní a automobilovou dopravu. V této kapitole je ve stručnosti popsána historie vznětového motoru a dále je vysvětlen princip jeho fungování. Pozornost je také věnována chemickým emisím vznikajícím důsledkem nedokonalého spalování a možnostem snižování hodnot těchto složek výfukových plynů.

2.1.1 Historie

Vznětový motor, někdy též označovaný „dieselový motor“, je pojmenován podle konstruktéra Rudolfa Diesela. Rokem vzniku klasického čtyřdobého vznětového motoru lze označit rok 1897, kdy vznikl třetí prototyp Diesela motoru. V tomto motoru byl spalován petrolej, který byl do válce dopravován pomocí stlačeného vzduchu, a zapálení paliva nastalo vlivem kompresního tepla. (1)

Díky své vysoké ekonomičnosti si vznětové motory našly rychle uplatnění, avšak velké rozměry a vysoká hmotnost těchto motorů byly limitujícími faktory co se týká oblastí použití. Z počátku byly používány výhradně jako motory stabilní nebo lodní.

Teprve až s příchodem vstřikovacího čerpadla bylo možné použití vznětových motorů ve vozidlech. První nákladní vozidlo se vznětovým motorem vzešlo z produkce firmy Benz v roce 1923 a v roce 1936 byl firmou Daimler–Benz představen první sériově vyráběný osobní automobil poháněný tímto druhem motoru.

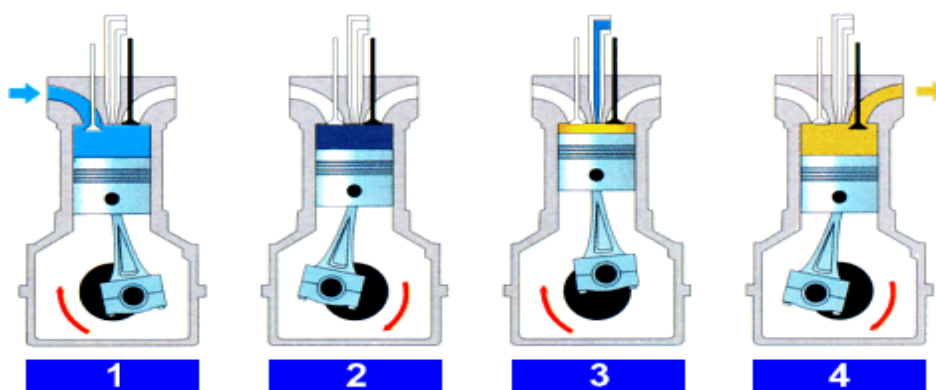
2.1.2 Princip činnosti

Vznětový spalovací motor je pístový motor, u něhož probíhá spalování uvnitř pracovního válce, tzn. jedná se o motor s vnitřním spalováním, ve kterém jsou pracovní látkou přímo produkty spalování kapalného paliva. Palivo je přiváděno přímo do pracovního válce motoru nebo do komůrky, kde dojde vlivem vysoké teploty stlačeného vzduchu ke vznícení paliva a následnému vzniku potenciální energie působící na píst motoru. Výsledná síla je poté přenášena přes ojnici na klikovou hřídel, na které vzniká točivý moment. (1) (2) (3)

Pístový motor pracuje v termodynamickém cyklu, při kterém dojde ke spálení paliva s kyslíkem. Podle počtu fází, při kterých cyklus probíhá, lze rozdělit vznětové motory na dvoudobé a čtyřdobé. V dnešní době je naprostá většina vznětových motorů používaných ve vozidlech čtyřdobých a jejich celková účinnost se pohybuje v rozmezí 35–45 %. Dvoudobé vznětové motory jsou dnes určeny výhradně k pohonu velkých lodí či lokomotiv a jejich celková účinnost může přesahovat 50 %. (1) (2)

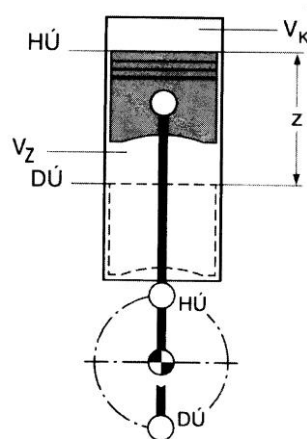
2.1.2.1 Pracovní oběhy čtyřdobého motoru

Pracovní cyklus čtyřdobého motoru probíhá ve čtyřech zdvizích pístu motoru ve spolupráci s ventilovým rozvodem, kterým je zajišťována výměna směsi ve válci. Píst motoru se pohybuje ve válci ve čtyřech fázích, viz Obrázek 1. Fáze pracovního cyklu motoru se nazývají: 1. Sání, 2. Komprese, 3. Expanze, 4. Výfuk.



Obrázek 1 Činnost čtyřdobého vznětového motoru (4)

V jednotlivých fázích se píst motoru pohybuje mezi horní úvratí (HÚ) a dolní úvratí (DÚ), viz Obrázek 2. Vzdálenost mezi HÚ a DÚ je označována jako zdvih a čas, za který píst urazí tuto dráhu, je nazýván takt. (3)



Legenda:

<i>HÚ</i>	horní úvrat'
<i>DÚ</i>	dolní úvrat'
<i>z</i>	zdvih [m]
<i>V_z</i>	zdvihový objem [m ³]
<i>V_k</i>	kompresní objem [m ³]

Obrázek 2 Pohyb pístu (3)

Při první době se pohybuje píst z HÚ do DÚ, čímž je skrz otevřený sací ventil a vlivem podtlaku nasáván čistý vzduch. Při druhé době jsou ventily zavřeny a píst se pohybuje z DÚ do HÚ. Tímto pohybem je nasátý vzduch stlačován. Tlak stlačeného vzduchu na konci komprese se pohybuje mezi hodnotami 3,0–5,5 MPa a teplota dosahuje 700–900 °C. Těsně před tím, než dosáhne píst HÚ, je vstříknuto palivo a při kontaktu paliva s horkým vzduchem dojde k jeho vznícení. Aby bylo dosaženo teploty nutné k vznícení paliva, musí být motory konstruovány tak, aby byl jejich kompresní poměr $\varepsilon_{min} = 12$, podle vztahu 1. (1)

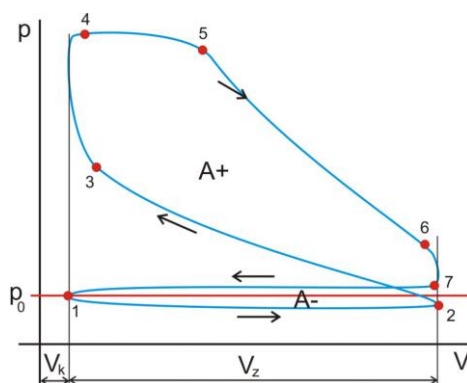
$$\varepsilon_{min} = \frac{V_z + V_k}{V_k} \quad (1)$$

Při vznícení paliva dochází k rozpínání hořících plynů a tato tlaková energie působící na horní plochu pístu začne pohybovat pístem od HÚ k DÚ. Tlak ve válci pak dosahuje hodnoty 6–10 MPa a teplota až 2000 °C. Při třetí době píst koná užitečnou práci. Při čtvrté době je otevřen výfukový ventil a pohybem pístu z DÚ k HÚ je vytlačována spálená náplň válce do výfukového potrubí. Po ukončení pracovního cyklu se následně celý proces opakuje. (1)

2.1.2.2 p-V diagram pracovního oběhu

Diagram p-V je jedním z diagramů pracovního oběhu motoru, kde plocha vytvořená diagramem vyjadřuje vytvořenou nebo spotřebovanou mechanickou práci. Pomocí p-V diagramu je sledován průběhu tlaku p v závislosti na okamžitém objemu válce V . Tuto závislost lze sledovat buď v teoretické rovině s využitím matematických metod, nebo lze zaznamenat také skutečný průběh pomocí přesného měření. Při matematickém rozboru oběhu se počítá s oběhem ideálním, který je však platný pouze za určitých předpokladů, nebo s oběhem teoretickým, který

vznikne zpřesněním oběhu ideálního. Skutečný pracovní oběh lze stanovit pouze přesným měřením, jelikož je ovlivněn řadou ztrát, průběhem přívodu tepla a výměnou tepla mezi náplní a stěnami válce. Hodnoty tlaku jsou měřeny například pomocí piezoeletrického snímače, jehož hodnoty jsou pak vztaheny k úhlu pootočení klikového hřídele motoru. Na základě úhlu pootočení klikového hřídele a známé dráhy pístu je pak určen objem motoru, ke kterému je vztahen naměřený tlak. Takto naměřená závislost je zobrazena na indikátorovém diagramu, viz Obrázek 3. (1) (2)



Obrázek 3 Indikátorový diagram (5)

2.1.2.3 Tepelná bilance

Tepelná bilance motoru vyjadřuje skutečnost, že z celkového množství tepla dodaného palivem je pro užitečný výkon využita pouze určitá část. Některé z tepelných ztrát, například ztráty chlazením a výfukem, jsou pro spolehlivé fungování motoru nezbytné, avšak obecným cílem je snaha tyto ztráty minimalizovat. Tepelnou bilanci lze vyjádřit vztahem 2. Ze vztahu 3 lze poté vypočítat celkovou účinnost motoru. (1)

$$Q_p = Q_{ns} + Q_{ch} + Q_s + Q_v + Q_m + Q_e \quad (2)$$

$$\eta_e = \frac{Q_e}{Q_p} \quad (3)$$

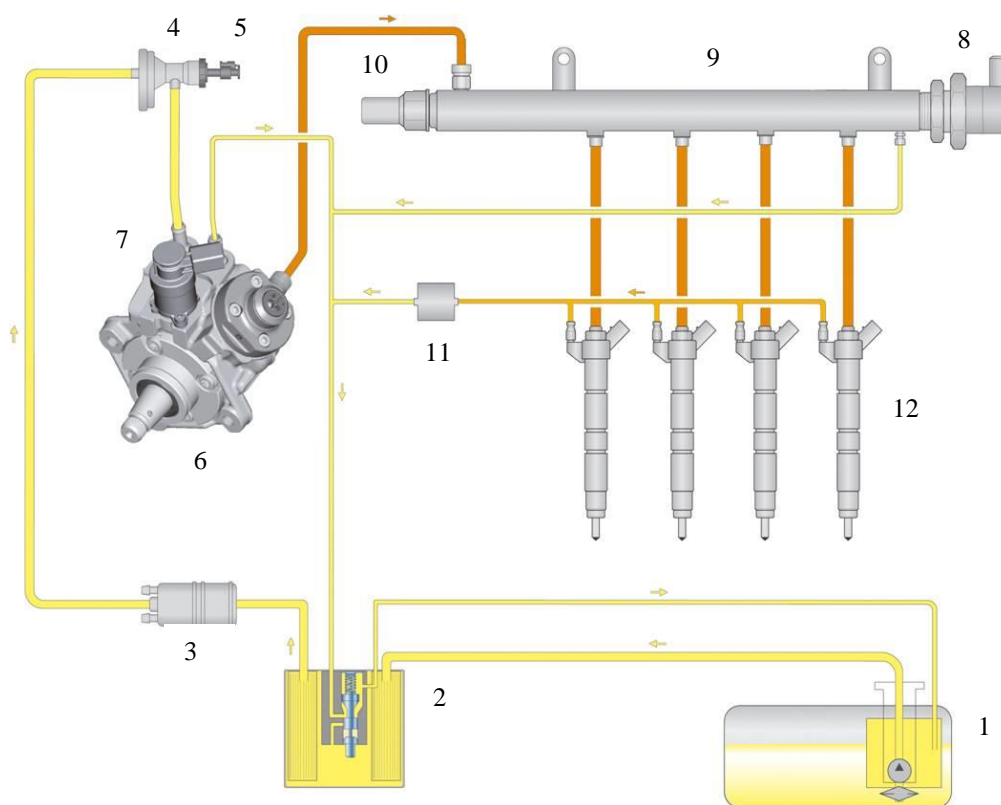
Legenda:

- Q_p teplo přivedené palivem [$\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$]
- Q_{ns} teplo ztracené nedokonalým spálením paliva
- Q_{ch} teplo odvedené chlazením (chladicí kapalinou nebo vzduchem, mazacím olejem) [$\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$]
- Q_s teplo odvedené sáláním [$\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$]
- Q_v teplo odvedené výfukem [$\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$]
- Q_m mechanické ztráty [$\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$]
- Q_e efektivní teplo (ekvivalent užitečného výkonu) [$\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$]
- η_e celková účinnost

2.1.3 Palivová soustava

Hlavním účelem palivové soustavy je doprava určitého množství paliva do spalovacího prostoru v určitém okamžiku. Množství a moment dodávky paliva závisí na zatížení a podmínkách, ve kterých je motor provozován.

Jednotlivé části palivové soustavy se liší podle konstrukce vstřikovacího zařízení, avšak obecně je palivová soustava tvořena dvěma okruhy. Prvním okruhem je okruh nízkotlaký, který slouží k dopravě paliva z palivové nádrže k vysokotlakému čerpadlu. Dalšími funkcemi této části jsou filtrace, odlučování vody a předehřev paliva. Mezi jednotlivými sekcemi nízkotlaké části proudí palivo nízkotlakým palivovým potrubím. Vysokotlaký okruh slouží ke generování tlaku paliva, jeho dopravě a rozprášení do spalovacího prostoru. Tento okruh je tvořen vysokotlakým čerpadlem, vysokotlakým potrubím a vstřikovači, které jsou koncovou částí palivové soustavy. Jednotlivé komponenty palivové soustavy moderních motorů se vstřikovacím systémem „Common Rail“ jsou znázorněny, viz Obrázek 4. (6)



Obrázek 4 Palivová soustava vstřikovacího systému Bosch CP4 (7)

Legenda:

1	elektrické palivové čerpadlo	7	ventil dávkování paliva
2	palivový filtr s předehřevem	8	ventil regulace tlaku
3	přídavné elektrické čerpadlo	9	„rail“ (tlakový zásobník paliva)
4	filtrační vložka	10	snímač tlaku v „railu“
5	snímač teploty paliva	11	ventil protitlaku
6	vysokotlaké čerpadlo	12	vstříkovací ventily

2.1.3.1 Tvorba směsi

Ve spalovacím prostoru vznětových motorů musí dojít k vytvoření heterogenní směsi paliva se vzduchem, tak aby bylo hoření směsi postupné. Tvorba směsi může být realizována dvěma způsoby, a to buď způsobem termickým nebo objemovým. Termický způsob je využíván u motorů s děleným spalovacím prostorem, tzn. nepřímé vstříkování paliva. Objemový způsob je aplikován u motorů s neděleným spalovacím prostorem, tzn. přímé vstříkování paliva. V současné době převládá konstrukce motorů s neděleným spalovacím prostorem. (1) (3)

Nepřímé vstříkování

U vznětových motorů s nepřímým vstříkáváním se vstříkuje palivo do oddělené části spalovacího prostoru, která je nazývána komůrka. U osobních automobilů byla nejčastěji používána tzv. vírová komůrka. Takto konstruované motory se v porovnání s motory s přímým vstříkem vyznačovaly tišším a měkčím chodem, avšak poměrně vysokou spotřebou paliva. (1) (3)

Přímé vstříkování

U takto konstruovaných motorů se vstříkuje palivo přímo do spalovacího prostoru, který je tvořen prohloubením v pístu. U takto konstruovaných motorů musí dojít k co nejjemnějšímu rozprášení paliva, což klade vysoké nároky na vstříkovací zařízení, které pracuje s vysokými tlaky až 250 MPa, a na kvalitu paliva. Motory s přímým vstříkáváním paliva se vyznačují ekonomičtějším provozem. Mezi nepříznivé projevy lze zařadit hlučnější a tvrdší chod. (1) (3)

2.1.3.2 Systémy vstříkování paliva

Způsob dodávky paliva ovlivňuje výraznou měrou výkonové parametry, ekonomičnost a ekologičnost motoru. S rostoucími nároky na ekologičnost provozu spalovacích motorů a snížení celkové hlučnosti, docházelo také k vývoji palivových soustav, zejména pak vstříkovacích zařízení, s cílem optimalizovat přípravu směsi. U moderních vznětových motorů

s přímým vstřikováním jsou pro dokonalé rozprášení směsi využívány vysoké tlaky, které je možno přizpůsobit aktuálnímu provoznímu stavu. Moderní systémy umožňují také vstřikování paliva skládající se až z devíti sekvencí, což má pozitivní vliv na průběh spalování. Systém vstřikování Common Rail využívá vstřikovače s elektromagnetickým ventilem nebo vstřikovače s piezoelektrickým členem. Přehled používaných systémů přímého vstřikování paliva vznětových motorů: (1) (8)

1. řadové čerpadlo,
2. rotační čerpadlo,
 - s axiálními písty,
 - s radiálními písty,
3. sdružený vstřikovací systém (UPS),
4. sdružená vstřikovací jednotka (UIS),
5. vstřikovací systém s tlakovým zásobníkem (Common Rail). (1)

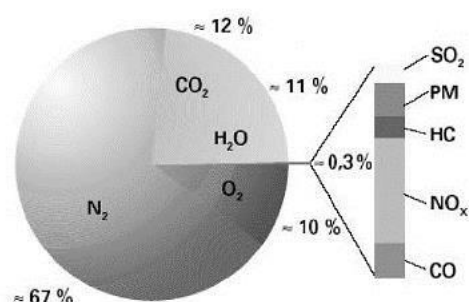
2.1.4 Chemické emise spalovacího procesu

V průběhu spalování směsi paliva a vzduchu v prostoru válce vznikají vzájemnou reakcí složky všech skupenství, které vystupují ze spalovacího prostoru a skrz výfukové potrubí jsou emitovány do ovzduší. Podle analýz obsahují výfukové plyny spalovacích motorů až 160 jednotlivých složek a podle odhadů jsou spalovací motory zodpovědné za 70 % světové produkce emisí oxidu uhelnatého a 19 % emisí oxidu uhličitého. (9)

2.1.4.1 Složení výfukových plynů

Při dokonalé oxidaci paliva na bázi uhlovodíků se vzduchem vznikají pouze produkty dokonalého hoření, tzn. oxid uhličitý (CO_2) a voda (H_2O) v plynném skupenství. Teoreticky je pro dokonalé spálení 1 kg nafty potřeba 14,78 kg vzduchu. V reálných podmínkách však není spalování ve spalovacích motorech dokonalé a kromě CO_2 a H_2O obsahují výfukové plyny i další složky jako jsou: kyslík (O_2), dusík (N_2), oxidy dusíku (NO_x), oxid uhelnatý (CO), nespálené uhlovodíky (HC), pevné částice (PM), oxidy síry a další. Typické složení výfukových plynů vznětového motoru, viz Obrázek 5. Mnohé z těchto komponent jsou zdraví škodlivé, a proto je jejich obsah ve výfukových plynech limitován emisními normami. Mezi přímo sledované škodliviny u vznětových motorů se řadí CO , NO_x , HC a PM . Nesilniční mobilní stroje musí plnit emisní normy označované Etapa (Stage) pro evropský trh a Tier pro trh

v Severní Americe. V současné době jsou v platnosti normy Etapa IV a Tier 4. Osobní a užitková vozidla uváděná na trh od 1. 9. 2018 podléhají emisní normě Euro 6c. (9) (10)



Obrázek 5 Složení výfukových plynů vznětového motoru (1)

Významný vliv na koncentraci jednotlivých složek ve výfukových plynech má součinitel přebytku vzduchu lambda (λ), viz vztahy 4 až 7. Vznětové motory pracují s výrazným přebytkem vzduchu, kdy součinitel přebytku vzduchu v režimech plného zatížení dosahuje hodnot $\lambda \approx 2$.

$$\lambda = \frac{M_v}{M_p \cdot L_{vt}} \quad (4)$$

$$\lambda = 1 = \text{stechiometrická směs} \quad (5)$$

$$\lambda < 1 = \text{bohatá směs} \quad (6)$$

$$\lambda > 1 = \text{chudá směs} \quad (7)$$

Legenda:

M_v hmotnost suchého vzduchu ve směsi [kg]

M_p hmotnost paliva ve směsi [kg]

L_{vt} teoretické množství suchého vzduchu potřebného k dokonalé oxidaci paliva [kg·kg⁻¹]

Oxid uhelnatý CO

CO je jedovatý plyn, který se váže na hemoglobin intenzivněji než kyslík, čímž je blokována funkce dýchání. Hlavní příčinou vzniku CO je spalování bohaté směsi, nicméně může být

zjištěn zvýšený výskyt i při spalování chudých směsí, a to v důsledku zpomalení reakcí ve fázi oxidace CO na CO₂. (9) (10)

Oxidy dusíku NO_x

Oxidy dusíku tvoří oxid dusnatý NO, oxid dusný N₂O a oxid dusičitý NO₂. Z oxidů dusíku se mezi škodlivé řadí zejména NO₂, jehož škodlivost je řazena výše než v případě CO. NO_x mají také významný podíl na tvorbě oxidačního smogu. NO_x vznikají oxidací vzdušného dusíku spolu s kyslíkem. NO_x vznikají zejména při vysokých teplotách a tlacích ve spalovacím prostoru. Jejich tvorba je závislá na bohatosti směsi a koncentraci kyslíku, tzn. tvorba NO_x klesá s rostoucí hodnotou součinitele λ . Charakteristikou pro tvorbu NO_x je, že svého maxima dosahuje v okamžiku, kdy je tvorba ostatních emisí velmi nízká. (9) (10)

Nespálené uhlovodíky HC

Pojmem HC jsou souhrnně označovány komponenty, jejichž škodlivost je různá. Nejškodlivější jsou polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH). HC vznikají za nepříznivých oxidačních podmínek v důsledku předčasně zastavených oxidačních reakcí, například v chladnějších oblastech při stěnách válce. Na tvorbu HC má kromě bohatosti směsi významný vliv také teplotní režim motoru a konstrukce spalovacího prostoru a pístu. (9)

Pevné částice PM

Pevné částice jsou tvořeny zejména pevným uhlíkem ve formě sazí, jsou tvořeny také popelem, zbytky nespáleného motorového oleje a nespáleným palivem. Pevné částice nejsou samy o sobě toxické, ale jsou na ně vázány toxické látky jako například PAH. Saze jsou tvořeny nedokonalým spalováním při vysokých teplotách bez přístupu kyslíku a jejich množství klesá s rostoucím součinitelem λ . (9)

2.1.4.2 Zařízení pro úpravu výfukových plynů

Aby vznětové motory splňovaly přísné emisní limity, tak se kromě konstrukce motoru a způsobu vstřikování přistupuje k opatřením mimo spalovací prostor, které slouží k dodatečné redukci emisí.

Recirkulace výfukových plynů (EGR)

U vznětových motorů se pro snížení emisí NO_x využívá EGR. Úlohou EGR je snížení špičkových teplot spalování a snížení množství přivedeného kyslíku a to tím, že se do spalovacího prostoru přivede část výfukových plynů. Při nízkém zatížení motoru lze

recirkulovat vysoké procento výfukových plynů, nicméně s rostoucím množstvím recirkulovaných výfukových plynů roste kouřivost motoru. Poloha otevření EGR ventilu může dosahovat hodnot až 40 %. (1) (9)

Oxidační katalyzátor (DOC)

Pomocí DOC dochází ke snižování koncentrace nedokonalých produktů spalování ve výfukových plynech. DOC je tvořen nerezovým obalem, ve kterém je kovový nebo keramický katalyzátorový nosič, na kterém je nanесena aktivní katalytická vrstva z ušlechtilých kovů. DOC umožňuje snížit emise CO a HC až o 90 %. (9)

Filtr pevných částic (DPF)

Filtr pevných částic bývá velmi často umístěn ve společném tělese s oxidačním katalyzátorem a jeho úkolem je zachytávání pevných částic. Účinnost filtrace je až 99 %. Zachytáváním částic dochází k postupnému ucpávání filtru, což vyžaduje jeho čištění nebo výměnu. Čištění probíhá pomocí regenerativního aktivního či pasivního systému, kdy dochází ke spalování zachycených částic na CO₂. (9)

Selektivní katalytická redukce (SCR)

SCR slouží ke snižování emisí NO_x ve výfukových plynech. S využitím SCR může být motor provozován v oblastech, kde produkuje větší množství NO_x, avšak zároveň menší množství HC a pevných částic. Mechanismus SCR vychází z použití SCR katalyzátoru, ve kterém dochází k reakci amoniaku (NH₃) s NO_x a jejich následné přeměně na N₂ a H₂O. NH₃ se získává chemickou cestou z kapaliny „AdBlue“, která se skládá z 32,5 % močoviny a 67,5 % demineralizované vody, a je vstřikovávána do výfukového potrubí. S využitím systému SCR je dosaženo více než 80% snížení emisí NO_x a více než 30% snížení emisí pevných částic. (1) (9)

2.2 Kapalná paliva pro vznětové motory

Palivem primárně určeným pro provoz vznětových motorů je motorová nafta, která se však řadí mezi ropné produkty, tzn. mezi zdroje vyčerpatelné. Neoddiskutovatelným faktem je, že spalování motorové nafty přispívá velkou měrou k negativním dopadům na životní prostředí. Zdroje pro výrobu motorové nafty nejsou neomezené a odhaduje se, že světová těžba ropy by měla být na svém maximu okolo roku 2020. Výše zmíněné skutečnosti jsou hlavními motivy pro stále se rozšiřující užívání kapalných biopaliv pro pohon vozidlových spalovacích motorů. Tato skutečnost se již v současnosti odráží i na složení běžné motorové nafty, ve které může být v určité míře obsažena biosložka, viz kap. 2.2.4.

Celosvětová spotřeba ropy a jiných kapalných paliv, mezi které se řadí například bioetanol a bionafta, má s výjimkou roku 2009 rostoucí trend. Mírný pokles v roce 2009 byl zapříčiněn v důsledku globální finanční krize. Předpokládaná spotřeba v roce 2035 dosahuje více než 112 mb/d (milión barelů/den), což je oproti roku 2008 nárůst o 26,5 mb/d. Vývoj ve spotřebě těchto paliv je zachycen, viz Tabulka 1. Tento nárůst v poptávce bude pokrýván jak z konvenčních, tak z nekonvenčních zdrojů. Kapalná biopaliva zastupovaná převážně bioetanolem a bionaftou tvořila v roce 2010 přibližně 2,7 % z celosvětové spotřeby paliv používaných pro dopravní prostředky. Největší nárůst v produkci a spotřebě biopaliv v roce 2035 se předpokládá ve Spojených státech amerických a v Brazílii. (11)

Tabulka 1 Celosvětová spotřeba ropy a jiných kapalných paliv (Zpracováno podle) (11)

Rok	Spotřeba [mb/d]	Nárůst [%]
1990	67,0	0,0
2008	85,7	21,8
2009	83,9	-2,1
2010	86,0	2,4
2035	112,2	23,4

2.2.1 Legislativa a její plnění

Vstup České republiky (ČR) do Evropské unie (EU) a přijetí společné politiky přineslo významné změny v oblasti pohonných hmot. Již na základě směrnice 2003/30/ES si EU stanovila cíl do roku 2020 pokrýt biopalivy a palivy z jiných obnovitelných zdrojů desetinu z celkových energetických nároků evropské dopravy. Minimální 10% podíl biopaliv z celkové spotřeby benzínu a nafty v daném státu stanovený pro rok 2020 platí shodně pro každý členský stát EU. (12) (13)

Do splnění výše zmíněného cíle pokrytí spotřeby energie dopravy biopalivy mohou být započítávána pouze paliva splňující tzv. kritéria udržitelnosti. Tato kritéria lze rozdělit na dvě povinnosti. První povinností je doložení původu biopaliva, během jehož výroby nedošlo k narušení biologické diverzity. Druhým kritériem je poté prokázání, že během celého výrobního cyklu biopaliva došlo k určité úspoře emisí skleníkových plynů GHG v porovnání s fosilními palivy. Tato úspora musí činit od 1. 1. 2018 minimálně 60 % při používání biopaliv, která byla vyrobena v zařízeních, jež zahájila činnost 1. 1. 2017 či později. Nejpokročilejší systém kontroly kritérií udržitelnosti biopaliv má Německo, kde existují dva certifikační systémy ISCC a REDcert. (14)

Je-li brán v úvahu cíl určený pro rok 2010, kdy měla být náhrada biopalivy v EU 5,75 %, tak skutečná náhrada obnovitelnými zdroji byla 2,5 %, což je méně než polovina stanoveného cíle pro rok 2010. Úrovně stanovené směrnicí budou s největší pravděpodobností schopny dosahovat pouze státy, které již historicky ve větší míře biopaliva využívají. Mezi tyto státy lze zařadit například Francii a Německo. ČR se řadí mezi státy, kterým se dlouhodobě nedaří plnit indikativní cíle EU. Aby bylo dosaženo kolektivního cíle stanoveného pro rok 2020, tak by na základě modelu z roku 2009, kdy se na produkci biopaliv v ČR nejvíce podílela řepka olejná (MEŘO) a pšenice (bioethanol), muselo být využito 110 %, resp. 28,37 % z celkové orné plochy dané plodiny pro výrobu biopaliv. (15)

Podle zákona o ochraně ovzduší §19 201/2012 Sb., jsou dodavatelé motorového benzínu nebo motorové nafty, kteří uvádí tyto pohonné hmoty do volného daňového oběhu pro dopravní účely na daňovém území ČR za kalendářní rok, povinni, aby bylo v těchto pohonných hmotách obsaženo i minimální množství biopaliva. To konkrétně: (16)

- a) ve výši 4,1 % objemových z celkového množství motorových benzinů přimíchaných do motorových benzinů
- b) ve výši 6,0 % objemových z celkového množství motorové nafty přimíchaných do motorové nafty (16)

Tato biopaliva musí splňovat stejná kritéria udržitelnosti jako v předchozím případě a pouze tato biopaliva jsou způsobilá k finanční podpoře při jejich spotřebě. (14)

Pohonné hmoty jsou v ČR kromě DPH zatíženy také spotřební daní podle zákona č. 353/2003 Sb., konkrétně jsou pak předmětem daně z minerálních olejů §45. Běžná motorová nafta spadající do kategorie středních olejů a těžkých plynových olejů podle § 45 odst. 1 písm. b), přičemž podíl metylesterů mastných kyselin nesmí činit více než 7 % objemových všech látek ve směsi obsažených, je zdaňována sazbou 10950 Kč/1000 l. Tato nafta je v současné době prodávána pod označením B7. Motivačním faktorem pro užívání biopaliv namísto fosilních paliv, je jejich daňové zvýhodnění. Sazba daně směsi B30 skládající se z běžné motorové nafty a metylesterů řepkového oleje, splňujícího kritéria udržitelnosti, jehož podíl je minimálně 30 obj. %, činí 8515 Kč/1000 l. V případě biopaliva B100 obsahujícího 100 obj. % metylesterů mastných kyselin uvedených pod kódem nomenklatury 3824 90 99 a zároveň splňujícího kritéria udržitelnosti biopaliv, je zdanění 2190 Kč/1000 l. Sazbou 1610 Kč/1000 l jsou zdaněny rostlinné oleje uvedené pod kódy nomenklatury 1507 až 1518, které splňují

kritéria udržitelnosti biopaliv a jsou určeny k použití, nabízeny k prodeji nebo používány pro pohon motorů. (17)

Nárok na vrácení daně z minerálních olejů má osoba užívající tyto oleje pro zemědělskou prvovýrobu a pro provádění hospodaření v lese. Podmínkou nároku na vrácení daně je, že tato osoba minerální oleje podle § 45 odst. 1 písm. b), nebo směsi těchto olejů s obsahem metylesterů do mastných kyselin do 7 obj. % za cenu obsahující daň nebo tyto oleje vyrobila a tyto nakoupené nebo vyrobené minerální oleje prokazatelně použila pro zemědělskou prvovýrobu nebo pro provádění hospodaření v lese. Vratka daně podle odvětví prvovýroby a použitého paliva může činit až 9500 Kč/1000 l. (17)

2.2.2 Vlastnosti paliv

Vlastnosti paliva výraznou měrou ovlivňují kvalitu spalování s čímž jsou spojeny například výkonové parametry motoru, měrná spotřeba paliva, složení výfukových plynů a v neposlední řadě i životnost pohonné jednotky. Parametry sledované u motorové nafty se mírně liší od parametrů sledovaných u paliv na bázi rostlinných olejů, u kterých se oproti motorové naftě zkoumají i další hodnoty. Některé parametry paliv na bázi rostlinných olejů se dají ovlivňovat například jejich sklizní, čištěním, sušením, skladováním, výrobou, filtrací atd., viz Příloha 1.

2.2.3 Metylestery mastných kyselin rostlinného původu (FAME)

Metylestery mastných kyselin mohou být v dnešní době a v souladu s požadavky normy ČSN EN 590+A1 přimíchávány do běžné nafty nebo mohou být používány ve 100% koncentraci jako motorové palivo pro vznětové motory (více viz kap. 2.2.6.1.). Tyto látky však musí již samy o sobě splňovat požadavky podle normy ČSN EN 14214+A1, viz Tabulka 2 a Příloha 2.

Tabulka 2 Technické požadavky na FAME (Přepřacováno podle) (18)

Parametr	Jednotka	Limitní hodnoty	
		min.	max.
Obsah metylesterů mastných kyselin	% (m/m)	96,5	/
Hustota při 15 °C	kg·m ⁻³	860	900
Viskozita při 40 °C	mm ² ·s ⁻¹	3,50	5,00
Bod vzplanutí	°C	101	/
Cetanové číslo	/	51	/

2.2.4 Motorová nafta B7

Na základě normy ČSN EN 590+A1, která určuje technické požadavky a metody zkoušení prodáváných a dodávaných naft, je zřejmé, že již běžné motorové nafty mohou obsahovat určitý podíl biosložky. Konkrétně se jedná až o 7,0 obj. % FAME. Stále však lze koupit motorové nafty, které neobsahují žádnou biosložku, a to například na čerpacích stanicích EuroOil pod označením OPTIMAL DIESEL+. Požadavky na dodávané motorové nafty, viz Tabulka 3 a Příloha 3. Pozitivním faktem je, že při nezávislém testování bylo prokázáno, že má tato nafta minimální vliv na mechanické vlastnosti těsnících O-kroužků z polyakrylátového elastomeru. (19)

Tabulka 3 Technické požadavky na motorovou naftu (Přepřacováno podle) (20)

Parametr	Jednotka	Limitní hodnoty	
		min.	max.
Cetanové číslo	/	51	/
Obsah FAME	% (V/V)	/	7
Hustota při 15 °C	kg·m ⁻³	820	845
Bod vzplanutí	°C	>55	/
Viskozita při 40 °C	mm ² ·s ⁻¹	2,00	4,50

2.2.5 Směsná motorová nafta B30

Směsná motorová nafta je směsí motorové nafty a minimálně 30 obj. % FAME. Pohonná hmota s označením B30 musí splňovat parametry podle normy ČSN 65 6508, viz Tabulka 4 a Příloha 4. Toto palivo se doporučuje používat ve vozidlech, u nichž výrobce uvádí směsnou motorovou naftu jako akceptovatelné palivo pro pohon. Nicméně pro spalování této směsi nejsou nutné žádné konstrukční úpravy motoru. (9)

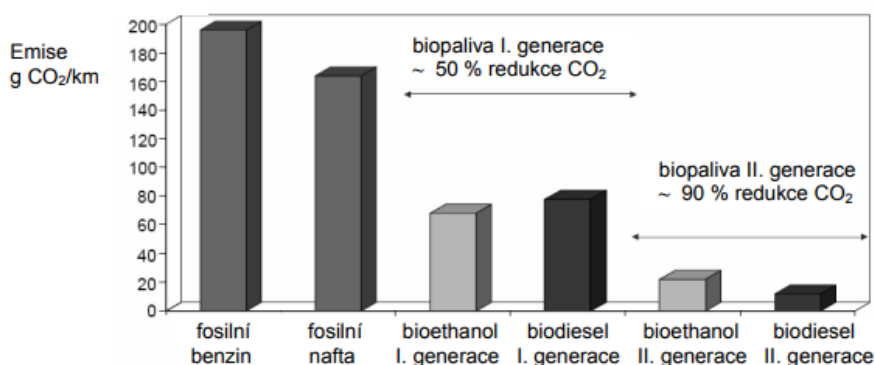
Tabulka 4 Technické požadavky na směsnou motorovou naftu B30 (Přepřacováno podle) (21)

Parametr	Jednotka	Limitní hodnoty	
		min.	max.
Cetanové číslo	/	51	/
Obsah FAME	% (V/V)	30	/
Hustota při 15 °C	kg·m ⁻³	820	860
Bod vzplanutí	°C	>55	/
Viskozita při 40 °C	mm ² ·s ⁻¹	2,00	4,50

2.2.6 Biopaliva

Biopaliva jsou určitou formou alternativních paliv, která jsou vyráběna z biomasy. Biomasou je míněna biologicky rozložitelná část produktů, odpadů a zbytků biologického původu ze zemědělství, lesnictví a souvisejících odvětví včetně rybolovu, akvakultury a dále také z biologicky rozložitelných částí průmyslových a komunálních odpadů. Podle druhu vstupní suroviny lze biopaliva rozdělit do tří generací. (9)

Mezi hlavní důvody pro využívání biopaliv se řadí zejména to, že se na rozdíl od fosilních paliv řadí mezi obnovitelné zdroje, jejichž zásoba se obnovuje v časových intervalech srovnatelných s jejich využíváním. Mezi další potenciální výhody se řadí možnost snížení závislosti na dovážených pohonných hmotách. Další výhodou je určitá redukce emisí GHG, především pak CO₂, které je docíleno tím, že při spalování rostlinného materiálu je vyprodukováno pouze takové množství CO₂, které bylo při růstu rostliny spotřebováno při fotosyntéze. Nejedná se o 100% redukci, protože při samotném pěstování a zpracování rostlin na biopalivo dojde k produkci CO₂. Potenciál úspory emisí CO₂ je zachycen, viz Obrázek 6. Úspora emisí CO₂ může v případě biopaliv první generace činit až 50 % a u paliv druhé generace až 90 %. Negativním faktorem je to, že na výrobu energetických plodin pro výrobu biopaliv jsou potřebné velké zemědělské plochy, což se projevuje zabíráním půdy pro pěstování potravin. Výsledkem zabírání této půdy je poté riziko růstu cen potravin. Jako další negativa lze mnohdy označit nutnost úpravy palivové soustavy, v některých případech zkrácení intervalu výměny oleje a u části biopaliv také zvýšení produkce některých škodlivých emisí. Mezi nejkomerčněji využívaná biopaliva se řadí alkoholy a metylestery rostlinných olejů. (22)



Obrázek 6 Potenciál snížení emisí biopalivy (22)

2.2.6.1 I. generace

Biopaliva první generace jsou vyráběna z plodin sloužících zejména k výrobě potravin. Biomasa pro výrobu těchto paliv je neefektivněji produkována v tropických oblastech, zejména pak na plantážích cukrové třtiny. V těchto regionech však může docházet k ničení přírodních ekosystémů ve prospěch pěstování energetických plodin, což může vést ke zvyšování kyselosti půdy, zvýšenému používání pesticidů a ztrátě biodiverzity. V určitých případech mohou negativní vlivy spojené s pěstováním potravinářských surovin pro energetické účely výrazně degradovat přínosy biopaliv první generace. (22) (23)

Čistý rostlinný olej

Čistý rostlinný olej je surový nebo rafinovaný, ale chemicky neupravený olej vyrobený z olejnatých rostlin lisováním nebo extrakcí, jehož jakost splňuje požadavky výrobce motoru a zároveň splňuje požadavky týkající se emisí. Rostlinné oleje se skládají až z 99 % z triglyceridů a mohou být získávány například z řepky olejné, slunečnice, sóji atd. V našich klimatických podmínkách je využíván především řepkový olej, jehož parametry musí odpovídat požadavkům podle ČSN 65 6516. Použití čistého řepkového oleje ve spalovacích motorech je zejména díky jeho vysoké viskozitě (viz Tabulka 5), která je významným parametrem ovlivňujícím tvorbu směsi (viz Příloha 1), poněkud komplikované, a proto se tento olej většinou ještě dále chemicky upravuje na MEŘO. Snížení viskozity lze bez složité chemické úpravy dosáhnout také smísením rostlinného oleje s motorovou naftou nebo alkoholy a případně také konstrukčním zásahem do palivové soustavy motoru. (9) (23) (24)

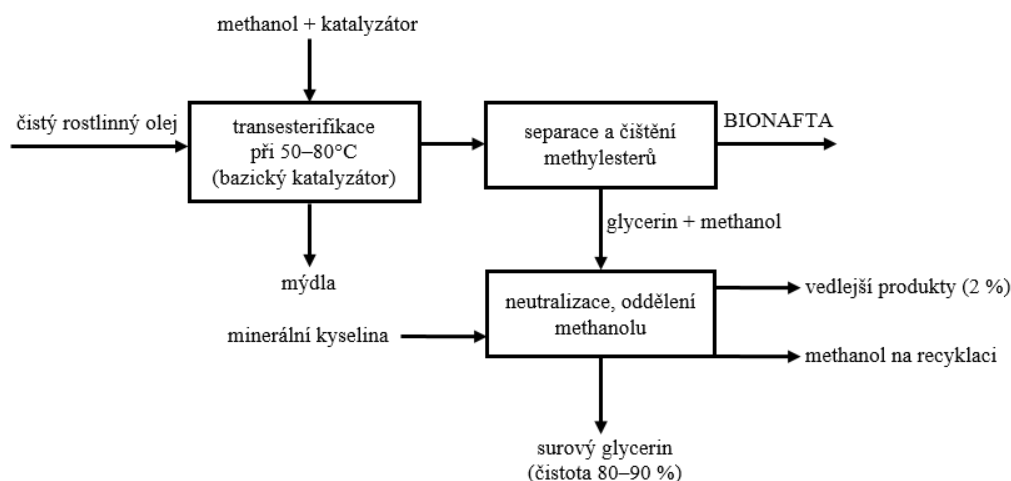
Tabulka 5 Porovnání kinematické viskozity (Převzato) (23)

Parametr	Motorová nafta	MEŘO	Řepkový olej	
Kinematická viskozita (mm ² ·s ⁻¹)	-25 °C	5–30	/	300
	0 °C	3–14	10	180–220
	20 °C	2–8	6,3–8,1	65–100
	100 °C	0,7–2	1,7	6–8

Bionafta

Bionafta je metylesterem vyrobeným z rostlinného oleje nebo živočišného tuku o jakosti motorové nafty. Pro výrobu paliva se 100% obsahem FAME se v České republice nejčastěji používá metylester řepkového oleje, který je označován MEŘO (RME). Řepkový olej je výhodný zejména díky své vysoké výhřevnosti a příznivému obsahu oleje v semenech, který dosahuje až 50 %. Pro výrobu 1 t MEŘO je potřeba 2,62–3,2 t zrna řepky olejné. MEŘO vzniká chemickou reakcí triglyceridů rostlinného oleje s metanolem za přítomnosti katalyzátorů, viz

Obrázek 7. Výsledný produkt má velmi podobné parametry jako motorová nafta, avšak na základě studií bylo zjištěno, že při spalování ve vznětovém motoru dochází k poklesu výkonu přibližně o 5–10 %, nárůstu spotřeby, snížení průměrné tepelné účinnosti přibližně o 3,5 %, ale ke zvýšení tepelné účinnosti o 3 % při maximálním zatížení. Při spalování paliva s obsahem 100 % MEŘO je sledováno snížení kouřivosti a obsahu CO přibližně o 48 % vůči spalování motorové nafty. Obsah HC ve výfukových plynech klesne až o 67 %, nicméně dochází k nárůstu emisí NO_x až o 10 %. (9) (23) (25)



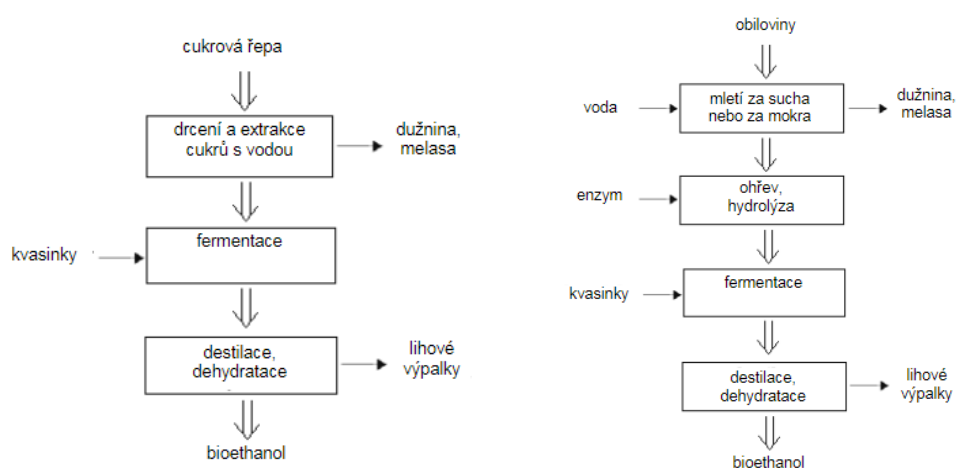
Obrázek 7 Schéma výroby metylesteru řepkového oleje (23)

Podle druhu použitého oleje se metylestery označují v zahraniční terminologii následovně:

- **RME** – metylester řepkového oleje,
- **SME** – metylester slunečnicového oleje,
- **SOME** – metylester ze sójových bobů,
- **VUOME** – metylester z použitých fritovacích olejů,
- **AFME** – metylester z odpadních živočišných tuků a lojů. (23)

Bioethanol

Bioethanol (C_2H_5OH) je vyráběn ze surovin obsahujících jednoduché cukry nebo látky, které na ně lze přeměnit (škrob). Výroba bioethanolu, která je založena na fermentačním procesu, je schematicky zachycena na Obrázku 8. Mezi významné suroviny pro výrobu bioethanolu se řadí kukuřice a cukrová třtina, které se využívají zejména v USA, resp. v Brazílii. V České republice jsou nejpoužívanějšími surovinami obilí a cukrová řepa. Bioethanol lze vyrábět také z brambor. Toto palivo je primárně určeno pro zážehové motory. Bioethanol se, vzhledem k nízkému cetanovému číslu, nízké kinematické viskozitě a špatné mísitelnosti s motorovou naftou, neřadí mezi paliva příliš vhodná pro vznětové motory. S jeho využitím ve vznětových motorech se však experimentuje, a to jak ve formě směsí s motorovou naftou, tak i s využitím v čisté formě pouze s přísadkou 5–7 % aditiv pro zlepšení mazivosti a cetanového čísla. Testy spalování bioethanolu s přísadou AVOCET ve směsi 95/5 na traktoru Zetor 7701 ukázaly v porovnání s motorovou naftou snížení emisí NO_x a CO, avšak 57% nárůst nespálených HC. (9) (23)



Obrázek 8 Schéma výroby bioethanolu z biomasy obsahující jednoduché cukry, resp. škrob (31)

Biobutanol

Biobutanol C_4H_9OH (n-butanol) je vyráběn ze stejných surovin jako bioethanol. Běžnou technologií výroby je acetone-butanol-ethanol (ABE) fermentační proces, při kterém je však výtěžnost butanolu až třicetkrát nižší v porovnání s výtěžností ethanolu. Nová technologie výroby probíhá dvoustupňovou fermentací působením nově vyšlechtěných kvasinek *Clostridium tyrobutyricum* a *Clostridium acetobutylicum* a následným oddělováním butanolu od ostatního materiálu v regenerační jednotce. Při této metodě je výtěžek butanolu ze 100 kg kukuřice až 38 l. (26) (27) (28)

Biobutanol lze použít jako vhodnou náhradu k bioethanolu a to především díky vyššímu cetanovému číslu, vyšší výhřevnosti, nižší teplotě vznícení, lepším mazacím vlastnostem a mísitelnosti s motorovou naftou a rostlinnými oleji. Použitím biobutanolu jako aditiva ve FAME a zejména v rostlinných olejích je docíleno podstatného snížení hustoty a viskozity paliva, což má pozitivní vliv na jeho spalování. Při testování spalování směsí biobutanolu a FAME v poměrech 10/90, 30/70 a 50/50, byl při NRSC testu na traktoru ZETOR Forterra 8641 sledován pokles výkonu až 20 %, ale zároveň také výrazný pokles emisí NO_x a PM až o 35 %, resp. 90 % v porovnání s motorovou naftou. Oproti tomu ale došlo k nárůstu spotřeby paliva až o 40 % a zvýšení emisí CO a HC až o 45 %, resp. 40 %. (25)

bioETBE

Bioetyl tert-butyl éter neboli bioETBE je vyráběn adiční reakcí bioethanolu s isobutanem. Tato látka se běžně používá jako přísada do benzínu. BioETBE má podobné vlastnosti jako bioethanol a při jeho spalování ve vznětových motorech bylo zjištěno snížení kouřivosti a NO_x, avšak zvýšení emisí HC. (29)

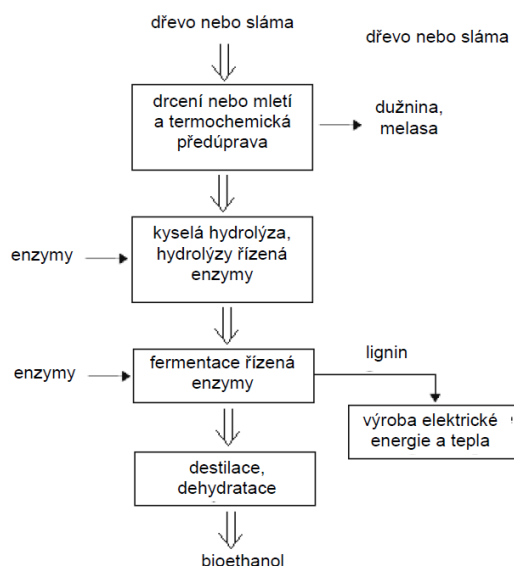
2.2.6.2 II. generace

Vzhledem k nutnosti nižších zásahů do ekosystémů a mnohem většímu potenciálu úspory emisí CO₂ v porovnání s biopalivy první generace se jako výrazně vhodnější jeví biopaliva druhé generace, na jejichž výrobu je používána biomasa získaná z nepotravinářských plodin a odpadního lignocelulózového materiálu. Mezi typické suroviny pro výrobu biopaliv druhé generace se řadí dřevo, dřevní odpad, použitý papír, rychle rostoucí traviny a sláma. Velkou výhodou je, že pro pěstování výchozích produktů lze využívat méně úrodné a nevyužité půdy, čímž se lze vyhnout záboru orné půdy využívané pro pěstování rostlin pro potravinářské účely. Například alkoholy mohou být vyráběny z lignocelulózové biomasy, kterou obsahují zemědělské odpadní materiály jako je sláma z obilnin, stébla kukuřice nebo bagasa. Největší překážkou konvenčního použití biopaliv druhé generace je v současné době komplikovanější a nákladnější výroba konečného produktu ve srovnání s biopalivy první generace. V budoucnu však mají tato biopaliva oproti biopalivům první generace větší potenciál, protože náklady a nároky na kvalitu vstupních surovin jsou porovnání s nimi mnohem nižší. (22) (23) (30)

Bioethanol

Bioethanol vyráběný z lignocelulózového materiálu není prozatím komerčně využíván, a to především díky poměrně komplikované výrobě, jelikož je hydrolýza lignocelulózové biomasy

obtížnější než hydrolýza škrobu pro paliva I. generace. Nejperspektivnějšími druhy hydrolýzy lignocelulózy pocházející např. z vrby nebo blahovičnicku eukalyptu jsou kyselá hydrolýza nebo hydrolýza pomocí enzymu. Schéma výrobního postupu bioethanolu II. generace, viz Obrázek 9. (31)



Obrázek 9 Schéma výroby bioethanolu z lignocelulózy biomasy (31)

Biobutanol

V současnosti je biobutanol vyráběn hlavně z konvenčních surovin na bázi cukru a škrobu, jako je cukrová třtina, melasa a kukuřice. Hlavní překážkou širšího využití biobutanolu z lignocelulózy biomasy jsou vysoké náklady na jeho výrobu. Díky velkému potenciálu této látky probíhají neustále vývojové snahy o zefektivnění výroby a snížení výrobních nákladů tak, aby byl vůči palivům I. generace cenově konkurenceschopný. (32)

Syntetická motorová nafta

Výroba syntetické motorové nafty pomocí Fischer–Tropschovy (FT) syntézy byla vyvinuta již ve 30. letech 20. století, avšak k její výrobě byla původně využívána uhelná surovina. Syntetická motorová paliva vyráběná pomocí FT syntézy z biomasy nesou označení BTL (Biomass to Liquids). Vstupní surovinou pro FT syntézu je syntézní plyn nejčastěji vyráběný zplyňováním biomasy. Ve srovnání s motorovou naftou má syntetická motorová nafta vyšší cetanové číslo a dále neobsahuje síru a aromáty, což zajišťuje čistší spalování. Energetický obsah, hustota, viskozita a bod vzplanutí jsou u obou paliv srovnatelné. S produkcí paliv,

nejčastěji z dřevní štěpky nebo slámy procesem BTL, je spojována německá společnost Choren, která vyrábí syntetickou motorovou naftu pod označením Sundiesel. (23)

Biomethanol

Biomethanol (CH_3OH) je produkt katalytické konverze syntézního plynu získaného z biomasy. S využitím methanolu ve vznětových motorech se dříve experimentovalo, nicméně současný zájem o využití methanolu ve vznětových motorech byl přesunut k bio-dimethyléru (bioDME), který může být vyráběn také katalytickou konverzí syntézního plynu, případně dehydratací čistého methanolu. DME je při atmosférickém tlaku plynný, ale zkapalňuje již při tlaku >5 bar. Cetanové číslo DME je výrazně vyšší, než v případě methanolu, a dokonce je vyšší než u motorové nafty. V průběhu spalování DME nevznikají žádné oxidy síry (SO_x), žádné pevné částice a dochází k výraznému snížení emisí NO_x . (33)

2.2.6.3 III. generace

Biopaliva třetí generace jsou považována za biopaliva budoucnosti, avšak jejich výroba je v současné době technologicky velmi náročná a nákladná. Za ideální vstupní surovinu těchto paliv jsou považovány mikro-řasy. Mikro-řasy jsou jednobuněčné mikroskopické organismy, které se přirozeně vyskytují ve sladké vodě a mořském prostředí, avšak mohou být pěstovány i ve vodě odpadní. Existuje více než 300 000 druhů mikro-řas, jejichž rozmanitost je mnohem větší než u rostlin. Ve srovnání s vyššími rostlinami jsou mikro-řasy schopny efektivněji přeměňovat sluneční energii na biomasu. Protože buňky rostou ve vodné suspenzi, mají navíc účinnější přístup k vodě, CO_2 a dalším živinám. Současné výtěžky biopaliv z různých druhů biomasy jsou uvedeny, viz Tabulka 6. Z těchto hodnot vyplývá obrovský potenciál mikro-řas v porovnání s ostatními zdroji biomasy, protože některé druhy mikro-řas mohou mít obsah oleje až 80 % z jejich suché hmotnosti, a výtěžnost oleje je tedy velmi vysoká. (34)

Tabulka 6 Porovnání zdrojů biomasy (Převzato) (34)

Zdroj oleje	Výnos biopaliva ($\text{l}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$)
Sója	400
Slunečnice	800
Řepka olejka	1600
Dávivec	2000
Palmový olej	6000
Mikro-řasy	60000–240000

2.3 Konstrukční úpravy vznětových motorů pro spalování biopaliv

Spalování MEŘO

V osobních automobilech je u naprosté většiny výrobců moderních motorů tolerován maximálně 7% obsah biosložky v motorové naftě v souladu s normou ČSN EN 590+A1. Užívání motorové nafty s vyšším obsahem biosložky je obvykle pouze na vlastní riziko provozovatele vozidla, není-li uvedeno v provozním manuálu jinak. Značka Scania má v současné době na trhu 4 typy motorů, které mohou být provozovány na B100 a zároveň splňují normu EURO 6. U zemědělských strojů se bez omezení běžně používá směsná motorová nafta B30. Při používání B100 je však výrobci vozidel doporučován zkrácený interval výměny motorového oleje a palivových filtrů, případně i dodatečná instalace předčističe paliva. Obecně lze však říci, že je provozování vozidla na biopaliva s obsahem MEŘO vyšším než 7 % možné bez větších úprav, což potvrdilo i nezávislé testování společnosti PREOL a.s., která provedla zkoušky paliva B100 v zemědělské technice CASE, New Holland a Zetor. (9) (35)

Spalování rostlinného oleje

Provoz vznětového motoru na surový řepkový olej si vyžaduje větší konstrukční úpravy. Společnost Deutz je jedním z výrobců, který přizpůsobuje své pohonné jednotky pro spalování surového řepkového oleje a B100. Své motory vybavuje dvoupalivovými soustavami, kdy je palivová soustava Deutz Common Rail doplněna samostatnou nízkotlakou větví pro surový řepkový olej. Provoz probíhá tak, že se startuje pouze na motorovou naftu a po ohřevu řepkového oleje na 62 °C a při točivém momentu větším než 250 Nm po dobu 10 s dochází k automatickému přepnutí na spalování řepkového oleje. Automatické přepnutí na motorovou naftu nastane při poklesu teploty řepkového oleje pod 62 °C a poklesu točivého momentu pod 250 Nm po dobu delší než 40 s. (9)

Kromě výrobce Deutz je na trhu řada společností, které provádí přestavby vznětových motorů pro provoz na řepkový olej. Kromě obdobné konstrukce dvoupalivového systému jako u firmy Deutz, může být použit i jednopalivový systém. Jednopalivový systém je vybaven predehřevem paliva, zvětšeným průtočným potrubím a často elektrickým ohřevem bloku motoru. (9)

Speciálním typem motoru speciálně zkonstruovaným pro provoz na řepkový olej je Elsbett motor. U této konstrukce motoru je vstřikováno palivo jedno-otvorovou tryskou tangenciálně ke spalovacímu prostoru. Díky tomu vzniká v prostoru válce centrální zóna hoření s minimálním odvodem tepla. Motor je méně tepelně zatěžován a díky tomu postačuje pouze chlazení stěn válce a dna pístu olejem. (9)

Spalování ethanolu

Provoz vznětových motorů na bioethanol je bezproblémový do 10% zastoupení v motorové naftě. Princip tvorby směsi vznětového motoru může být uskutečněn například vstřikováním směsi bioethanolu a motorové nafty, pomocí dvou vstřikovacích čerpadel, nebo nasáváním směsi bioethanolu se vzduchem a vstřikováním motorové nafty přímo do spalovacího prostoru. Výrobce specializujícím se na konstruování vznětových motorů na ethanol je Scania. Motor DC9 E02 270 má upravenou palivovou soustavu včetně speciálních vstřikovačů, vyšší kompresní poměr a upravený tvar spalovacího prostoru. (9)

2.4 Měření provozních vlastností

Měření provozních vlastností slouží k exaktnímu posouzení charakteristik motoru. Mezi sledované parametry se řadí zejména průběh výkonu, průběh točivého momentu, spotřeba paliva a produkce emisí. Na základě těchto hodnot lze souhrnně diagnostikovat provozní vlastnosti motoru. Tyto výstupy mohou sloužit například jako poklady pro určování hospodárnosti provozu, stanovování technického stavu pohonné jednotky nebo také jako klíčové parametry sloužící k posuzování vhodnosti využívání jednotlivých druhů biopaliv.

2.4.1 Měření výkonových parametrů

Měřením výkonových parametrů motoru je myšleno stanovení výkonu [kW] a točivého momentu [Nm] v závislosti na frekvenci otáček motoru [min^{-1}]. Metody měření výkonových parametrů lze členit, viz Tabulka 7. (1)

Tabulka 7 Metody měření výkonových parametrů spalovacích motorů (Převzato) (1)

Způsob zatížení	Umístění motoru	Výstup výkonu	Princip měřicího zařízení
Stacionární (Statické) 1. Zatěžovacím momentem brzdy se udržují předvolené otáčky motoru 2. Zvolí se zatěžovací moment nezávisle na otáčkách	Zkušební stanoviště	Klikový hřídel nebo jiné srovnatelné místo	Absorpční dynamometry: 1. Elektromagnetické vířivé brzdy 2. Hydraulické brzdy 3. Mechanické frikční brzdy 4. Vzduchové brzdy 5. Tandemové brzdy Univerzální dynamometry: 1. Elektrodynamické motorgenerátory na stejnosměrný nebo střídavý proud Torzní dynamometry
	Ve vozidle	Obvod hnacích kol (válcové zkušebny)	
		Klikový hřídel nebo jiné srovnatelné místo	
Dynamické 1. Urychlování setrvačných hmot zvoleným točivým momentem	Ve vozidle	Obvod hnacích kol (válcové zkušebny)	Měření úhlového zrychlení setrvačných hmot
		Klikový hřídel nebo jiné srovnatelné místo	Měření úhlového zrychlení klikového hřídele
		Přepočít výkonu na klikový hřídel	Měření přímočarého zrychlení celého vozidla

2.4.2 Měření spotřeby paliva

V provozu majitelé vozidel běžně sledují hodnoty průměrné a okamžité spotřeby paliva [l/100 km]. Spotřeba paliva je ukazatelem hospodárnosti a také významným diagnostickým ukazatelem, podle něhož lze určit technický stav motoru. Hodnota měrné spotřeby paliva [$\text{g}\cdot\text{kWh}^{-1}$] vyjadřuje potřebné množství paliva na vykonanou práci pohonné jednotky. Měrná spotřeba tedy přesně charakterizuje účinnost motoru. Spotřeba paliva může mimo jiné sloužit jako diagnostický signál technického stavu motoru. Spotřebu lze měřit jak v provozu, tak i při testování na zkušebním stanovišti, například na válcové zkušebně, kde lze opakovaně uskutečňovat měření za stejných podmínek. (1)

Podle způsobu měření lze rozdělit metody stanovování spotřeby paliva následovně:

- **Volumetrické** – přímé měření pracující na principu měření objemu spotřebovaného paliva, které je vhodné jak pro měření za provozu, tak i pro měření na zkušebním stanovišti,
- **Gravimetrické** – přímé měření pracující na principu měření hmotnosti spotřebovaného paliva, které je použitelné pro měření na zkušebním pracovišti,
- **Emisní** – nepřímá metoda měření spočívající ve výpočtu spotřeby paliva ze známého objemového průtoku spalin. (1)

2.4.3 Měření emisí

Emise produkované při spalovacích procesech jsou významným faktorem ovlivňujícím výzkum a vývoj spalovacích motorů. Analýza obsahu spalin a vyhovující emisní parametry jsou podmínkou uvedení vozidla do sériové výroby, či jeho schválení k provozu v průběhu užívání. Složení výfukových plynů je rovněž ukazatelem kvality spalovacího procesu a v současné době i jedním z klíčových měřítek při posuzování jednotlivých druhů biopaliv. (10)

2.4.3.1 Metody zjišťování koncentrace plynných složek

Metodami používanými k měření koncentrace plynných složek jsou:

- měření založené na principu absorpce infračerveného záření,
- měření založené na principu absorpce ultrafialového záření,
- měření s využitím chemické luminiscence,
- měření založené na principu změny elektrické vodivosti vodíkového plamene,
- analyzátory pracující na principu měření magnetických vlastností. (10)

Měření založené na principu absorpce infračerveného záření

Přístroj využívající principu absorpce infračerveného záření se nazývá bezdisperzní infraanalýzátor nebo též NDIRA. Tento přístroj využívá skutečnost, že při průchodu elektromagnetického záření vrstvou plynu je část energie pohlcena. Obsah plynů, které obsahují v molekule alespoň dva různé atomy, se stanoví na základě individuální závislosti absorpčního koeficientu na vlnové délce záření. NDIRA je vhodná pro měření koncentrace CO a CO₂ a pro kontrolu produkce HC. V současné době se používají vícesložkové analyzátory, které umožňují simultánní měření koncentrace různých složek. (10)

Měření založené na principu absorpce ultrafialového záření

Optický analyzátor využívající absorpci ultrafialového záření se využívá ke zjišťování NO_x. Nevýhodou tohoto měření je to, že se jako zářič používá plynová výbojka, jejíž plynová náplň se za provozu spotřebovává. (10)

Měření s využitím chemické luminiscence

Metoda chemické luminiscence se využívá především pro stanovování NO_x, kdy se společně se vzorkem spalín do reaktoru přivádí ozón (O₃). V reaktoru je umístěn fotonásobič, z něhož jdou výstupní signály, které se dále zpracovávají elektronikou. Přístroj pracující na tomto principu se nazývá chemiluminiscenční analyzátor (CLA). (10)

Měření založené na principu změny elektrické vodivosti vodíkového plamene

Přístroj využívající elektrické vodivosti vodíkového plamene se nazývá plamenoionizační detektor (FID). Tento přístroj pracuje na principu nárůstu proudu iontů v plameni v závislosti na průtočném množství HC. (10)

Analyzátory pracující na principu měření magnetických vlastností

Hlavní součástí přístrojů je permanentní magnet nebo elektromagnet, který je využíván ke vtahování látek s vysokou permeabilitou do magnetického pole. Plynem s nejvyšší permeabilitou je kyslík, a proto se tyto přístroje využívají ke stanovování koncentrace kyslíku ve vzorku. (10)

2.4.3.2 Metody měření emise částic ze vznětových motorů

Metodami používanými k měření koncentrace pevných částic jsou:

- filtrační metoda,
- hmotnostní měření koncentrace částic,
- opacimetrie. (10)

Filtrační metoda

Dnes již nepoužívaná metoda fungující na principu zachytávání částic kouře na filtrační papírek. Výsledkem měření je stupeň zčernání udávaný v jednotkách °BOSCH. (10)

Hmotnostní měření koncentrace částic

Princip měření spočívá ve zvážení filtračního elementu ze skelných vláken, přes který prochází vzorek spalin, a následném opětovném zvážení filtračního elementu. Rozdíl těchto hodnot vztažených k objemu celkového množství spalin udává hmotnostní koncentraci částic ve vzorku. (10)

Opacimetrie

Opacimetrie je v praxi nepoužívanější metoda. Opacimetr je zařízení, které se skládá z měřicí trubice, do níž se přivádějí výfukové plyny a která má na jednom konci zdroj světla a na druhé straně fotonku. Tento přístroj slouží k prosvícení sloupce spalin a zjištění prošlého podílu záření, který využívá Behr–Lambertova zákona. Výstupní hodnotou je lineární stupeň absorpce světla N , ze kterého se následně podle vztahu 8 vypočte absorpční koeficient k . (10)

$$k = -\frac{1}{N} \ln \left(1 - \frac{N}{100} \right) \quad (8)$$

Legenda:

- k absorpční koeficient [m^{-1}]
 L délka optické dráhy [m]
 N lineární stupeň absorpce

3 Cíle práce

Cílem experimentální části je určit a porovnat vlivy použití zvolených paliv na provozní podmínky vznětového spalovacího motoru. Porovnávány budou hodnoty výkonových parametrů, měrné spotřeby paliva a koncentrace plynných složek a pevných částic, jejichž hodnoty se odvíjejí od použitého paliva.

Experimentální část práce se skládá z:

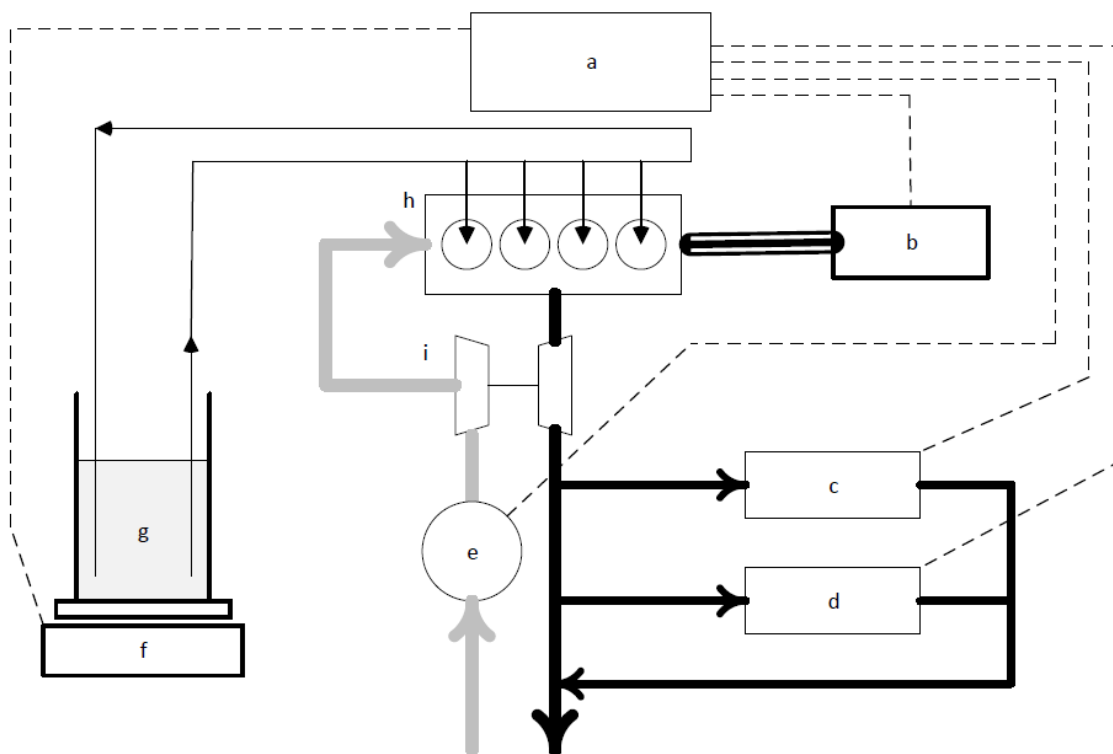
- získání dat měřením a vyhodnocení výkonových parametrů, spotřeby paliva a produkce emisí jednotlivých paliv,
- porovnání vlivu jednotlivých paliv na výkonové parametry motoru,
- porovnání vlivu jednotlivých paliv na měrnou spotřebu paliva,
- porovnání vlivu jednotlivých paliv na měrnou produkci sledovaných emisí.

4 Metodika

V této kapitole bude popsán postup a také jednotlivá zařízení, kterými bylo prováděno měření za účelem získání nezbytných dat pro výpočet sledovaných parametrů. V první kapitole této části práce bude popsán postup, kterým bylo měření výstupních hodnot prováděno. Ve druhé kapitole budou představena porovnávaná paliva a dále budou také určeny sledované parametry sloužící k dosažení cílů práce. Ve třetí kapitole poté budou podrobně popsána jednotlivá zařízení, pomocí kterých bylo experimentální měření uskutečněno.

4.1 Postup měření

Kompletní měření sledovaných parametrů bylo prováděno v laboratoři Katedry jakosti a spolehlivosti strojů, která se nachází v prostorách České zemědělské univerzity v Praze. Zkoušeným zařízením byl traktor Zetor Forterra 8641, jehož technické parametry se nijak neodlišovaly od sériových parametrů, viz Tabulka 9. Motor traktoru byl zatěžován pomocí dynamometru MAHA ZW-500, který byl k traktoru připojen přes zadní vývodový hřídel. Pro účely měření byla palivová nádrž traktoru odpojena a v jeho průběhu byla využita externí nádrž, která byla umístěna na laboratorní váze VIBRA AJ-6200 a pomocí níž byla na základě úbytku hmotnosti paliva v nádrži stanovována spotřeba testovaného paliva. Sání čerstvého vzduchu do motoru bylo pomocí plastové trubky vyvedeno mimo traktor. Přibližně v polovině této trubky byl instalován průtokoměr značky Sierra sloužící k měření množství nasávaného vzduchu. Hodnoty množství nasávaného vzduchu byly zaznamenávány pro účely přepočtu výstupních hodnot analyzátorů spalin z procentních do hmotnostních jednotek. Do výfukového potrubí měřeného traktoru bylo instalováno teplotní čidlo a sondy analyzátorů BrainBee AGS-200 a BrainBee OPA-100, které slouží k vyhodnocování složení spalin. Tyto sondy však nebyly ve výfukovém potrubí umístěny permanentně, nýbrž byly vkládány pro každý měřicí bod zvlášť. Kromě již zmíněných zařízení byly instalovány i další prvky např.: snímač otáček a teploty motoru MGT-300R a odlučovač pevných částic a vodních par. Výstupní data byla pomocí A/D převodníku Labjack U6 a softwaru Labjack ukládána do počítače. Obecné schéma měřicího systému lze vidět na Obrázku 10. (36)



Obrázek 10 Schéma měřicího systému (36)

Legenda

- a zařízení pro ukládání dat
- b dynamometr
- c analyzátor plyných složek emisí
- d opacimetr
- e snímač množství nasávaného vzduchu
- f laboratorní váha
- g externí nádrž
- h motor
- i turbodmychadlo

Před tím, než bylo zahájeno měření sledovaných parametrů motoru, muselo být nejprve připraveno dostatečné množství zkoušeného paliva tak, aby mohlo být v průběhu měření případně doplňováno do externí nádrže. Dále musel být motor traktoru zahřát na provozní teplotu. Z důvodu důkladného propláchnutí palivového systému muselo již zahřívání traktoru probíhat spalováním paliva, které má být následně hodnoceno. Po důsledném propláchnutí palivového systému a dosažení optimální provozní teploty motoru bylo zahájeno měření. Nejprve bylo nezbytné změřit vnější otáčkovou charakteristiku motoru spalujícího testované palivo tak, aby mohly být na jejím základě určeny měřicí body pro tzv. NRSC test, viz odstavec

NRSC test. Měření vnější otáčkové charakteristiky probíhá takovým způsobem, že dojde ke spuštění zadního vývodového hřídele a nastavení maximální dodávky paliva, která je ponechána v průběhu celého měření otáčkové charakteristiky. Jelikož dynamometr prozatím nevyvozuje žádný brzdový moment, a motor je tedy nezatížen, tak se jeho otáčky pohybují v oblasti maxima. Po zahájení měřicího cyklu se začne zvyšovat brzdový moment dynamometru, na základě čehož začnou klesat otáčky motoru. V průběhu vlastního měření dochází po poklesu otáček o určitou hodnotu v pravidelných intervalech k zaznamenávání snímaných veličin otáček motoru, výkonu P_{PTO} , točivého momentu M_{IB} , spotřeby paliva a otáček vývodového hřídele. V okamžiku, kdy poklesly otáčky motoru na hodnotu $1100 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$, došlo k ukončení měření. (37)

NRSC test

Mezinárodní norma ISO 8178 je standardem pro měření emisí výfukových plynů motorů určených pro nesilniční užití. Podle oblasti využití konkrétního motoru se také odlišují jednotlivé zkušební cykly. NRSC (Non-Road Steady Cycle) test je jednou ze zkušebních metod označovanou podle ISO 8178 jako cyklus C1, který se skládá z osmi režimů ustáleného stavu otáček a zatížení motoru dynamometrem. Prostřednictvím těchto režimů jsou simulovány podmínky běžného provozu traktoru. Jednotlivé měřicí body NRSC cyklu jsou popsány, viz Tabulka 8 a význam jednotlivých je popsán níže. (38)

Tabulka 8 NRSC test (Převzato) (37)

Číslo režimu	Otáčky motoru	Zatížení motoru [%]	Váhový faktor
1	Jmenovité	100	0,15
2	Jmenovité	75	0,15
3	Jmenovité	50	0,15
4	Jmenovité	10	0,10
5	Mezilehlé	100	0,15
6	Mezilehlé	75	0,10
7	Mezilehlé	50	0,10
8	Volnoběžné	-	0,15

- Jmenovité otáčky – maximální otáčky, které dovoluje regulátor otáček při plném zatížení motoru podle parametrů udávaných výrobcem
- Mezilehlé otáčky – otáčky při hodnotě maximálního točivého momentu motoru za splnění podmínky, že se tyto otáčky nacházejí v rozmezí 60–75 % jmenovitých otáček (v případě, že jsou tyto otáčky při maximálním točivém momentu nižší, resp.

vyšší, než je uvedený rozsah, pak jsou mezilehlé otáčky stanoveny na hodnotu 60 %, resp. 75 % jmenovitých otáček)

- Volnoběžné otáčky – otáčky v momentu nastavení regulátoru otáček na minimum
- Zatížení – procentuální podíl maximálního využitelného točivého momentu při daných otáčkách motoru
- Váhový faktor – hodnota, která slouží pro výpočet výsledné spotřeby paliva a hodnoty produkce emisí (37)

Na základě znalosti vnější otáčkové charakteristiky konkrétního paliva byly stanoveny jednotlivé body NRSC testu, ve kterých probíhalo měření spotřeby paliva a produkce emisí sledovaných složek výfukových plynů. Před zahájením samotného měření muselo vždy proběhnout nastavení zatížení motoru dynamometrem a ustálení otáček motoru tak, aby tyto parametry odpovídaly hodnotám stanoveným pro konkrétní měřený bod NRSC testu. Po ustálení otáček bylo zahájeno zaznamenávání měřených hodnot do počítače s tím, že zároveň probíhalo také ruční zapisování dat do formuláře, ze kterého byly následně použity hodnoty kouřivosti. Podle vztahů 9 a 10 byly na závěr vypočteny hodnoty měrné spotřeby paliva a specifických emisí jednotlivých složek výfukových plynů v průběhu celého NRSC testu.

$$m_{NRSC} = \frac{\sum_{i=1}^8 (M_{P,i} \cdot V_{F,i})}{\sum_{i=1}^8 (P_{PTO,i} \cdot V_{F,i})} \quad (9)$$

$$SE_{NRSC} = \frac{\sum_{i=1}^8 (HE_i \cdot V_{F,i})}{\sum_{i=1}^8 (P_{PTO,i} \cdot V_{F,i})} \quad (10)$$

Legenda:

m_{NRSC}	měrná spotřeba paliva v průběhu NRSC testu [g·kWh ⁻¹]
SE_{NRSC}	specifická emise měřené složky v průběhu NRSC testu [g·kWh ⁻¹]
$M_{P,i}$	hmotnostní hodinová spotřeba v režimu i [g·h ⁻¹]
HE_i	hmotnostní průtok složky v režimu i [g·h ⁻¹]
$V_{F,i}$	váhový faktor režimu i
$P_{PTO,i}$	výkon motoru na vývodovém hřídeli [kW]

4.2 Porovnávání paliva a sledované parametry

Pro experimentální měření byla vybrána paliva, jejichž využití představuje jistý potenciál vedoucí k poklesu produkovaných emisí spalovacími vznětovými motory a také k výslednému snížení závislosti na fosilních palivech. Jako alternativní paliva budou použity směsi motorové nafty, řepkového oleje a n-butanolu a dále směsi motorové nafty, slunečnicového oleje a n-butanolu v různých směšovacích poměrech. Etanolem, se kterým budou alternativní paliva porovnávána, je čistá motorová nafta.

Přehled paliv použitých k experimentálnímu měření:

- čistá motorová nafta (bez biosložky),
- směs 70 obj. % motorové nafty, 20 obj. % řepkového oleje a 10 obj. % n-butanolu,
- směs 60 obj. % motorové nafty, 20 obj. % řepkového oleje a 20 obj. % n-butanolu,
- směs 70 obj. % motorové nafty, 20 obj. % slunečnicového oleje a 10 obj. % n-butanolu,
- směs 60 obj. % motorové nafty, 20 obj. % slunečnicového oleje a 20 obj. % n-butanolu.

Sledované výkonové parametry jsou voleny tak, aby vystihovaly vliv použitého paliva na účinnost motoru. Porovnávání složky emisí jsou zvoleny jak na základě norem limitujících emise vznětových motorů, tak i na základě sledovaných, ale doposud zákonem nijak limitovaných sloučenin.

U jednotlivých paliv použitých pro pohon spalovacího vznětového motoru budou sledovány následující parametry:

- výkonové parametry (výkon a točivý moment),
- měrná spotřeba paliva,
- emise CO, CO₂, NO a PM.

4.3 Zařízení a přístroje použité při měření

Klíčovými prvky použitými při experimentálním měření v prostorách zkušebny jsou:

- měřený traktor,
- dynamometr,
- laboratorní váha,
- analyzátory spalin.

Měřený traktor

Měření probíhalo na sériově vyráběném traktoru Zetor Forterra typ 8641, rok výroby 2006, viz Obrázek 11. Traktor je poháněn čtyřdobým vznětovým spalovacím motorem chlazeným vodou. Konkrétně se jedná o čtyřválcový motor s přeplňováním turbodmychadlem a přímým vstřikováním paliva. Tento motor nese označení Z 1204 a plní emisní normu TIER II. Technická specifikace motoru použitého v traktoru Z 8641, viz Tabulka 9.

Tabulka 9 Technická specifikace traktoru Z 8641 (Zpracováno podle) (39)

Parametr	Jednotka	Hodnota
Počet válců	/	4
Obsah válců	cm ³	4156
Kompresní poměr	/	17
Jmenovitý výkon motoru podle ISO 2288	kW	60
Jmenovité otáčky	ot.·min ⁻¹	2200
Maximální točivý moment	Nm	351
Specifická spotřeba paliva při jmenovitém výkonu	g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹	253
Maximální přeběhové otáčky	ot.·min ⁻¹	2460
Volnoběžné otáčky	ot.·min ⁻¹	750



Obrázek 11 Zetor Forterra 8641 (Zdroj: autor)

Dynamometr

Pro účely stanovování výkonových parametrů motoru byl využit dynamometr MAHA ZW-500, který je schopen vyvozovat brzdny moment otáčení klikového hřídele a tím měnit celkové zatížení motoru. Tento dynamometr byl připojen k měřenému vozidlu přes zadní vývodový hřídel (PTO), viz Obrázek 12. Výkon motoru byl tedy přes zadní vývodový hřídel přenášen do

dynamometru, pomocí kterého lze změřit a zaznamenat otáčky PTO, přenesený točivý moment a výkon motoru. Pro převod hodnot točivého momentu zaznamenaných na PTO (M_{tB}) na odpovídající hodnotu točivého moment motoru (M_{tM}) slouží převodový koeficient 3,543. Jelikož není znám převodový koeficient, který by vyjádřil ztráty vzniklé při přenosu výkonu mezi motorem a PTO, tak bude v této práci uvažováno, že $P_M = P_{PTO}$. K ovládní dynamometru pak slouží speciální software. Technické parametry dynamometru jsou uvedeny, viz Tabulka 10.

Tabulka 10 Technické parametry MAHA ZW-500 (Zpracováno podle) (40)

Parametr	Jednotka	Hodnota
Maximální točivý moment	Nm	6600
Maximální otáčky	ot. \cdot min ⁻¹	2500
Maximální brzdňý výkon	kW	500
Hmotnost	kg	1300



Obrázek 12 Dynamometr MAHA ZW-500 (Zdroj: autor)

Laboratorní váha

K měření spotřeby paliva byla použita laboratorní váha VIBRA AJ-6200, viz Obrázek 13. Technické parametry váhy, viz Tabulka 11.

Tabulka 11 Technické parametry váhy VIBRA AJ-6200 (Zpracováno podle) (41)

Parametr	Jednotka	Hodnota
Maximální váživost	g	6200
Ověřitelný dílek	g	0,01
Přesnost	g	0,1



Obrázek 13 Váha VIBRA AJ-6200 (41)

Spalinové analyzátory

K analýze spalin byly využity přístroje značky BrainBee. Konkrétně se jednalo o analyzátory AGS-200 a OPA-100, viz Obrázek 14. Analyzátor AGS-200 je používán k měření hodnot emisí CO, CO₂, NO, O₂ a HC obsažených ve výfukových plynech proudících z výfukového systému testovaného motoru do atmosféry. Analyzátor OPA-100 (opacimetr) poté slouží ke stanovování hodnoty kouřivosti. Technický popis analyzátorů BrainBee, viz Tabulka 12. Obě měřicí zařízení byla prostřednictvím hadic propojena se sondami umístěnými ve výfukovém potrubí, čímž bylo zajištěno proudění spalin z výfukového systému do analyzátorů. Ve výfukovém potrubí je také instalován snímač teploty s teplotním rozsahem -200–1100 °C, který slouží k měření teploty spalin. Z důvodu provádění měření v uzavřených prostorách, bylo nad výfuk traktoru instalováno odsávací zařízení.

Tabulka 12 Technické parametry analyzátorů BrainBee AGS-200 a OPA-100 (Převzato) (36)

Složka	Rozlišení	Přesnost
CO	0,01 obj. %	0,03 obj. % nebo 5 % ČH
CO ₂	0,1 obj. %	0,5 obj. % nebo 5 % ČH
HC	1 ppm	10 ppm nebo 5 % ČH
O ₂	0,01 obj. %	0,1 obj. % nebo 5 % ČH
NO	1 ppm	10 ppm nebo 5 % ČH
Opacita	0,1 %	2 %
Teplota	1 °C	2,5 °C



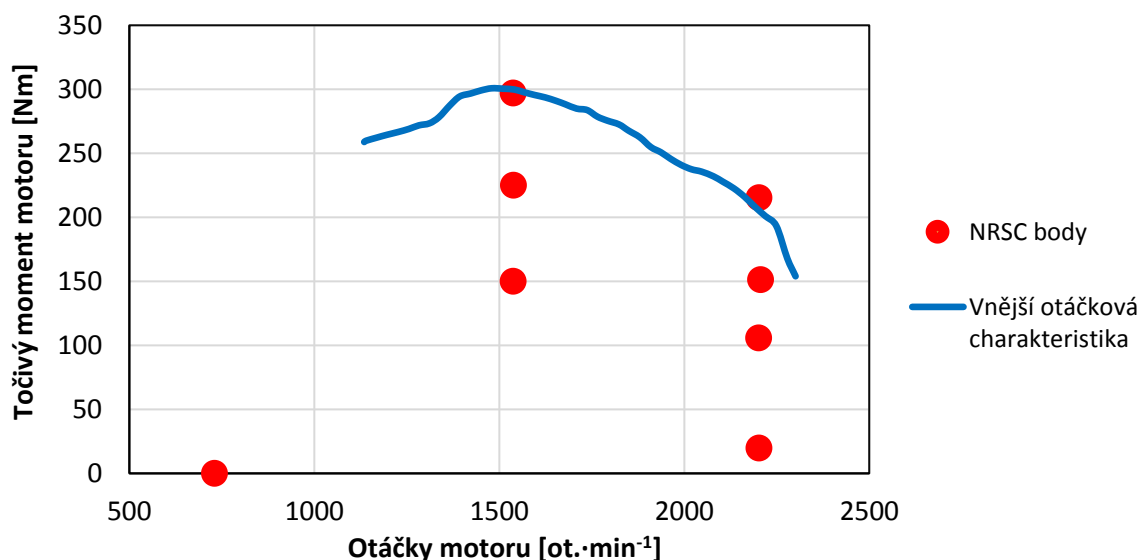
Obrázek 14 Měřicí sestava pro analýzu spalin (Zdroj: autor)

5 Výsledky měření

V této části práce budou prezentovány výsledky získané při měření výkonových parametrů, spotřeby paliva a produkce emisí v průběhu testovacího cyklu prováděného na měřeném traktoru Zetor Forterra 8641. Nejdříve budou vyhodnocena naměřená data zvláště pro jednotlivá paliva, a následně budou tato data vzájemně porovnána tak, aby byl získán komplexní přehled o jejich vlivech na parametry testovaného motoru.

5.1 Motorová nafta

Prvním testovaným palivem a zároveň etalonem, vůči kterému budou ostatní paliva porovnávána, je motorová nafta bez biosložky. Vnější očkovou charakteristiku a jednotlivé body, ve kterých probíhalo měření všech sledovaných parametrů, lze vidět na Obrázku 15. Charakteristiku jednotlivých režimů, ve kterých probíhal NRSC při použití tohoto paliva, viz Tabulka 13. Na základě této tabulky lze také vysledovat, že nejvyšší hodnota spotřeby motorové nafty $15500,79 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ byla naměřena v režimu č. 1, při kterém byl motor zatěžován ze 100 % a otáčky motoru se pohybovaly v oblasti jmenovitých otáček. Nejnižší spotřeba byla podle předpokladu při volnoběžných otáčkách a nejnižší měrná spotřeba $262,08 \text{ g}\cdot\text{kWh}^{-1}$ poté v bodě č. 5. Měrná spotřeba v průběhu celého NRSC testu byla $340,91 \text{ g}\cdot\text{kWh}^{-1}$.



Obrázek 15 Motorová nafta – vnější otáčková charakteristika motoru a NRSC měřicí body

Tabulka 13 Motorová nafta NRSC test – charakteristika režimů a spotřeba paliva

Číslo režimu	Otáčky PTO [ot.·min ⁻¹]	Točivý moment PTO [Nm]	Otáčky motoru [ot.·min ⁻¹]	Točivý moment motoru [Nm]	Výkon motoru [kW]	Spotřeba paliva [g·h ⁻¹]	Měrná spotřeba paliva [g·kWh ⁻¹]
1	621,44	763,06	2201,77	215,37	49,66	15500,79	312,15
2	622,67	536,31	2206,13	151,37	34,97	12211,86	349,20
3	621,32	374,28	2201,34	105,64	24,35	10243,44	420,63
4	621,37	70,17	2201,53	19,81	4,57	6149,39	1346,80
5	434,01	1052,28	1537,71	297,00	47,83	12534,46	262,08
6	434,07	797,23	1537,89	225,02	36,24	9896,65	273,10
7	434,02	531,93	1537,72	150,13	24,18	7320,41	302,80
8	206,04	0,00	730,00	0,00	0,00	900,04	-

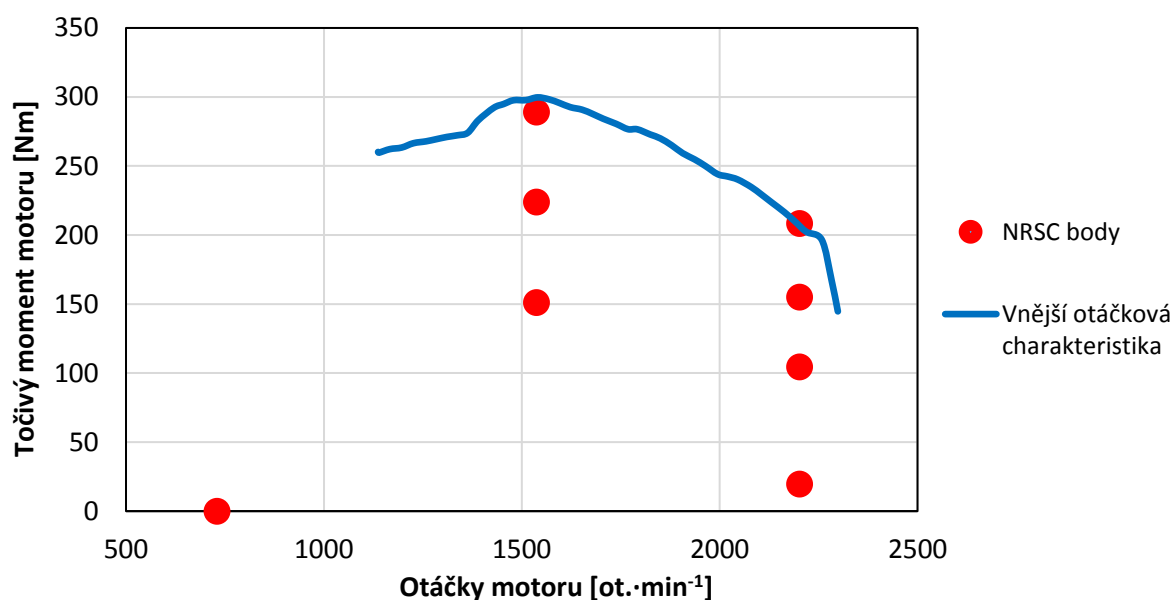
Hodnoty absolutní a měrné produkce sledovaných složek výfukových plynů lze vyčíst z Tabulky 14. Nejvyšší množství produkovaného CO bylo zaznamenáno v režimu č. 5 NRSC testu, kdy hodnota emitované složky byla 164,12 g·h⁻¹. Bod č. 5 je charakterizován 100% zatížením motoru při mezilehlých otáčkách. V průběhu měření v tomto režimu byly zaznamenány také maximální hodnoty absolutní produkce, NO a PM s výslednými hodnotami 367,31, resp. 27,29 g·h⁻¹. Maximální množství produkovaného CO₂ bylo pozorováno při jmenovitých otáčkách a 100% zatížení motoru, tedy v bodě č. 1. Výsledná produkce CO₂ v tomto režimu byla 59219,92 g·h⁻¹. Nejnižší hodnoty absolutní produkce všech složek emisí byly sledovány při volnoběžných otáčkách. Celkové množství specifických emisí produkovaných za celý NRSC test jsou následující: CO 2,50 g·kWh⁻¹; CO₂ 1312,72 g·kWh⁻¹; NO 7,74 g·kWh⁻¹; PM 0,30 g·kWh⁻¹.

Tabulka 14 Motorová nafta NRSC test – produkované emise

Číslo režimu	CO [g·h ⁻¹]	CO ₂ [g·h ⁻¹]	NO [g·h ⁻¹]	PM [g·h ⁻¹]	CO [g·kWh ⁻¹]	CO ₂ [g·kWh ⁻¹]	NO [g·kWh ⁻¹]	PM [g·kWh ⁻¹]
1	110,12	59219,92	347,39	16,61	2,22	1192,56	7,00	0,33
2	49,30	46474,73	256,19	6,65	1,41	1328,95	7,33	0,19
3	46,46	39416,40	165,61	3,81	1,91	1618,56	6,80	0,16
4	76,96	23492,84	56,91	5,21	16,86	5145,25	12,46	1,14
5	164,12	49620,16	367,31	27,29	3,43	1037,52	7,68	0,57
6	83,09	38581,50	307,02	6,52	2,29	1064,66	8,47	0,18
7	31,30	28635,83	210,34	2,87	1,29	1184,47	8,70	0,12
8	17,38	3120,49	27,95	0,22	-	-	-	-

5.2 Směs motorové nafty, řepkového oleje a butanolu v poměru 70/20/10

Dalším testovaným palivem je směs 70 obj. % motorové nafty, 20 obj. % řepkového oleje a 10 obj. % butanolu. Vnější otáčkovou charakteristiku motoru spalujícího tuto směs včetně měřicích bodů, ve kterých se provádí NRSC test, lze vidět na Obrázku 16. Přesnou charakteristiku a spotřebu tohoto paliva v jednotlivých režimech testu, viz Tabulka 15. Nejvyšší spotřeba této směsi byla zaznamenána v režimu č. 1, tedy při jmenovitých otáčkách a maximálním zatížení motoru. Hodnota spotřeby pohonných hmot byla $15799,47 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$. Nejmenší spotřeba byla vykazována při volnoběžných otáčkách s nulovým zatížením a nejnižší měrnou spotřebu $272,21 \text{ g}\cdot\text{kWh}^{-1}$ vykazoval motor v režimu č. 5. Hodnota měrné spotřeby za celý NRSC test měla hodnotu $354,34 \text{ g}\cdot\text{kWh}^{-1}$.



Obrázek 16 Směs MN/ŘO/B v poměru 70/20/10 – vnější otáčková charakteristika motoru a NRSC měřicí body

Tabulka 15 MN/ŘO/B v poměru 70/20/10 NRSC test – charakteristika režimů a spotřeba paliva

Číslo režimu	Otáčky PTO [ot.·min ⁻¹]	Točivý moment PTO [Nm]	Otáčky motoru [ot.·min ⁻¹]	Točivý moment motoru [Nm]	Výkon motoru [kW]	Spotřeba paliva [g·h ⁻¹]	Měrná spotřeba paliva [g·kWh ⁻¹]
1	621,64	738,66	2202,47	208,48	48,09	15799,47	328,57
2	621,45	549,40	2201,80	155,07	35,75	12841,61	359,16
3	621,52	370,25	2202,03	104,50	24,10	10545,42	437,61
4	621,55	69,25	2202,14	19,55	4,51	6424,22	1425,23
5	433,99	1024,06	1537,63	289,04	46,54	12668,70	272,21
6	434,02	793,43	1537,72	223,94	36,06	10046,92	278,61
7	433,98	534,99	1537,58	151,00	24,31	7523,38	309,44
8	206,04	0,00	730,00	0,00	0,00	939,25	-

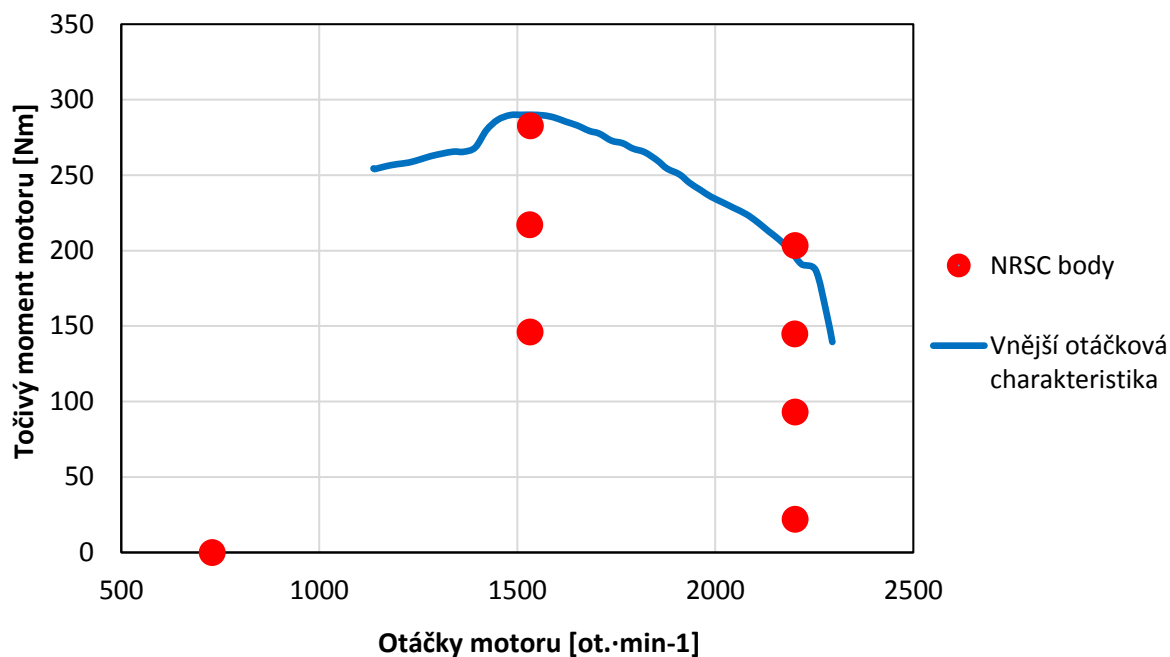
V Tabulce 16 jsou zachyceny hodnoty absolutní a měrné produkce emitovaných složek výfukových plynů. Největší množství CO vzniká v režimu č. 5, kdy absolutní produkce této složky činí 140,61 g·h⁻¹. Při stejných provozních podmínkách je emitováno také nejvyšší množství NO a PM, kdy byly hodnoty emisí 286,53 g·h⁻¹, resp. 21,46 g·h⁻¹. CO₂ byl v nejvyšší míře produkován v režimu č. 1, kdy byla jeho absolutní produkce 45500,47 g·h⁻¹. Nejnižší hodnoty absolutní produkce emisí byly opět sledovány při volnoběžných otáčkách motoru. Hodnoty specifických emisí produkovaných během celého NRSC testu jsou následující: CO 3,02 g·kWh⁻¹; CO₂ 1011,10 g·kWh⁻¹; NO 5,73 g·kWh⁻¹; PM 0,25 g·kWh⁻¹.

Tabulka 16 MN/ŘO/B v poměru 70/20/10 NRSC test – produkované emise

Číslo režimu	CO [g·h ⁻¹]	CO ₂ [g·h ⁻¹]	NO [g·h ⁻¹]	PM [g·h ⁻¹]	CO [g·kWh ⁻¹]	CO ₂ [g·kWh ⁻¹]	NO [g·kWh ⁻¹]	PM [g·kWh ⁻¹]
1	123,54	45500,47	268,43	17,02	2,57	946,24	5,58	0,35
2	75,66	35395,00	175,40	4,19	2,12	989,96	4,91	0,12
3	71,93	29701,25	112,09	3,86	2,99	1232,54	4,65	0,16
4	117,04	17864,33	37,64	3,51	25,97	3963,25	8,35	0,78
5	140,61	37718,66	286,53	21,46	3,02	810,44	6,16	0,46
6	65,23	29380,65	225,10	5,23	1,81	814,74	6,24	0,15
7	42,32	21542,65	152,94	1,56	1,74	886,05	6,29	0,06
8	35,98	2640,45	19,42	0,22	-	-	-	-

5.3 Směs motorové nafty, řepkového oleje a butanolu v poměru 60/20/20

Testována byla dále směs 60 obj. % motorové nafty, 20 obj. % řepkového oleje a 20 obj. % butanolu. Vnější otáčková charakteristika a režimy, ve kterých probíhal NRSC test, jsou vyobrazeny na Obrázku 17. Hodnoty výkonu, točivého momentu a otáček motoru při jednotlivých režimech jsou zachyceny v Tabulce 17. Spotřeba paliva 15912,23 g·h⁻¹ představovala nejvyšší spotřebu napříč všemi režimy a bylo jí dosaženo v režimu č. 1. Nejnižší hodnoty spotřeby, které činily 975,81 g·h⁻¹ a 278,23 g·kWh⁻¹, byly dosaženy v režimech č. 8, resp. č. 5. Měrná spotřeba směsi v průběhu celého testu byla 366,80 g·kWh⁻¹.



Obrázek 17 Směs MN/ŘO/B v poměru 60/20/20 – vnější otáčková charakteristika motoru a NRSC měřicí body

Tabulka 17 MN/ŘO/B v poměru 60/20/20 NRSC test – charakteristika režimů a spotřeba paliva

Číslo režimu	Otáčky PTO [ot.·min ⁻¹]	Točivý moment PTO [Nm]	Otáčky motoru [ot.·min ⁻¹]	Točivý moment motoru [Nm]	Výkon motoru [kW]	Spotřeba paliva [g·h ⁻¹]	Měrná spotřeba paliva [g·kWh ⁻¹]
1	621,50	720,71	2201,98	203,42	46,91	15912,23	339,23
2	621,23	513,07	2201,02	144,81	33,38	12478,45	373,85
3	621,52	329,71	2202,04	93,06	21,46	10157,31	473,33
4	621,51	77,73	2202,02	21,94	5,06	6535,67	1291,88
5	432,66	1001,31	1532,93	282,62	45,37	12622,51	278,23
6	432,39	768,89	1531,94	217,02	34,81	9969,94	286,37
7	432,57	517,66	1532,61	146,11	23,45	7434,64	317,05
8	206,04	0,00	730,00	0,00	0,00	975,81	-

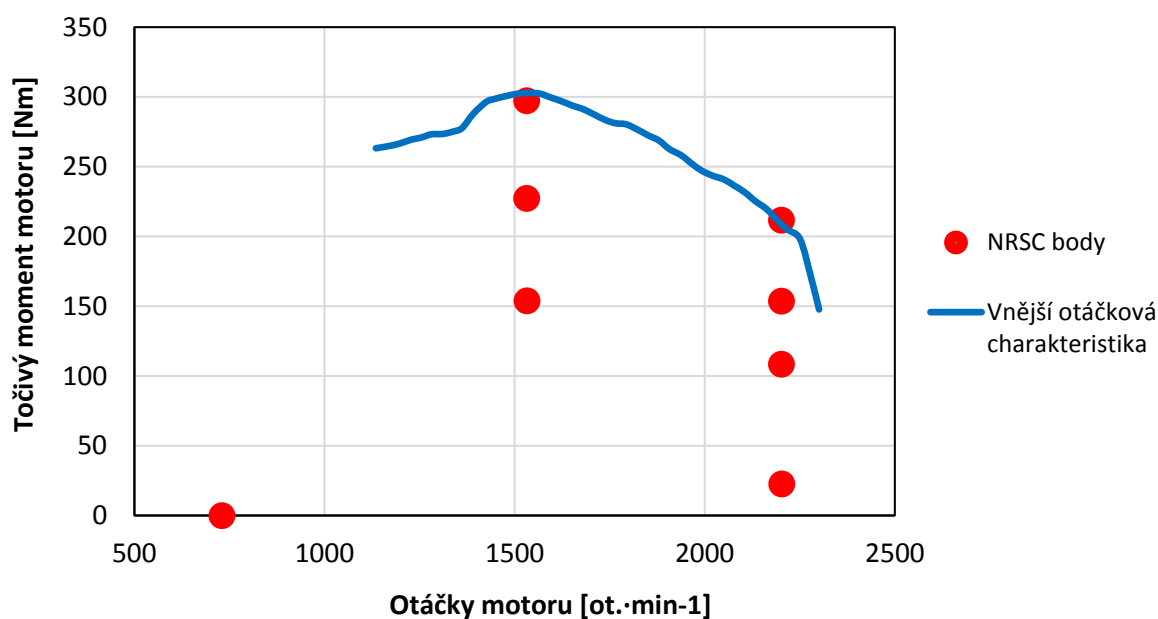
Přehled absolutní a měrné produkce vybraných složek emitovaných z výfukového systému traktoru jsou zachyceny, viz Tabulka 18. V bodě č. 5 bylo dosahováno shodně nejvyšších hodnot emisí CO, NO a PM. V tomto režimu bylo produkováno 96,15 g·h⁻¹ CO, 281,59 g·h⁻¹ NO a 11,35 g·h⁻¹ PM. Nejvyšší emitované množství CO₂ o hodnotě 45500,33 g·h⁻¹ příslušelo režimu č. 1. Nejnižší hodnoty emisí byly zaznamenány opět při volnoběžných otáčkách a nulovém zatížení motoru. Celková produkce specifických emisí v průběhu celého testovacího cyklu byla: CO 2,30 g·kWh⁻¹; CO₂ 1061,36 g·kWh⁻¹; NO 6,20 g·kWh⁻¹; PM 0,16 g·kWh⁻¹.

Tabulka 18 MN/ŘO/B v poměru 60/20/20 NRSC test – produkované emise

Číslo režimu	CO [g·h ⁻¹]	CO ₂ [g·h ⁻¹]	NO [g·h ⁻¹]	PM [g·h ⁻¹]	CO [g·kWh ⁻¹]	CO ₂ [g·kWh ⁻¹]	NO [g·kWh ⁻¹]	PM [g·kWh ⁻¹]
1	87,76	45500,33	269,58	9,86	1,87	970,02	5,75	0,21
2	38,91	36073,02	188,32	2,84	1,17	1080,74	5,64	0,09
3	69,17	29413,40	112,22	2,81	3,22	1370,66	5,23	0,13
4	92,95	18895,39	44,23	2,25	18,37	3734,99	8,74	0,44
5	96,15	36976,54	281,59	11,35	2,12	815,04	6,21	0,25
6	43,62	29454,30	243,53	3,33	1,25	846,03	7,00	0,10
7	39,83	21588,15	164,19	1,25	1,70	920,63	7,00	0,05
8	22,97	2631,41	21,16	0,23	-	-	-	-

5.4 Směs motorové nafty, slunečnicového oleje a butanolu v poměru 70/20/10

Směs 70 obj. % motorové nafty, 20 obj. % slunečnicového oleje a 10 obj. % butanolu byla testována v jednotlivých bodech NRSC zkušebního testu, které jsou spolu s vnější otáčkovou charakteristikou motoru znázorněny na Obrázku 18. Podrobný charakter jednotlivých režimů testu včetně spotřeby paliva je popsán, viz Tabulka 19. Největší množství paliva bylo spáleno při jmenovitých otáčkách a maximálním zatížení motoru. Hodnota spotřebovaného paliva činila 15908,64 g·h⁻¹. Nejnižší spotřeba paliva o hodnotě 958,61 g·h⁻¹ byla opakovaně naměřena v režimu č. 8 a nejnižší měrná spotřeba 269,75 g·kWh⁻¹ opět v režimu č. 5. V průběhu NRSC testu představovala měrná spotřeba paliva hodnotu 350,62 g·kWh⁻¹.



Obrázek 18 Směs MN/SO/B v poměru 70/20/10 – vnější otáčková charakteristika motoru a NRSC měřicí body

Tabulka 19 MN/SO/B v poměru 70/20/10 NRSC test – charakteristika režimů a spotřeba paliva

Číslo režimu	Otáčky PTO [ot·min ⁻¹]	Točivý moment PTO [Nm]	Otáčky motoru [ot·min ⁻¹]	Točivý moment motoru [Nm]	Výkon motoru [kW]	Spotřeba paliva [g·h ⁻¹]	Měrná spotřeba paliva [g·kWh ⁻¹]
1	621,59	749,91	2202,29	211,66	48,81	15908,64	325,91
2	621,52	544,75	2202,04	153,75	35,45	12637,88	356,45
3	621,50	384,15	2201,97	108,43	25,00	10641,45	425,63
4	621,69	80,39	2202,65	22,69	5,23	6576,40	1256,62
5	432,35	1053,04	1531,83	297,22	47,68	12861,05	269,75
6	432,39	805,09	1531,97	227,23	36,45	10176,96	279,17
7	432,60	545,10	1532,71	153,85	24,69	7626,47	308,84
8	203,04	0,00	730,00	0,00	0,00	958,61	-

Produkované množství emisí, které byly v průběhu experimentu vyhodnocovány, je zachyceno, viz Tabulka 20. Nejvyšší hodnota 152,98 g·h⁻¹ produkovaného CO byla naměřena při mezilehlých otáčkách a maximálním zatížení motoru. V tomto režimu bylo tvořeno také nejvyšší množství NO a PM, kdy byl hmotnostní průtok složky 379,92 g·h⁻¹, resp. 21,16 g·h⁻¹. Nejvyšší hodnota produkce CO₂ 56793,41 g·h⁻¹ byla zaznamenána v režimu č. 1. Specifické emise daných složek v průběhu celého NRSC testu činily: 2,86 g·kWh⁻¹ CO; 1270,08 g·kWh⁻¹ CO₂; 7,69 g·kWh⁻¹ NO; 0,24 g·kWh⁻¹ PM.

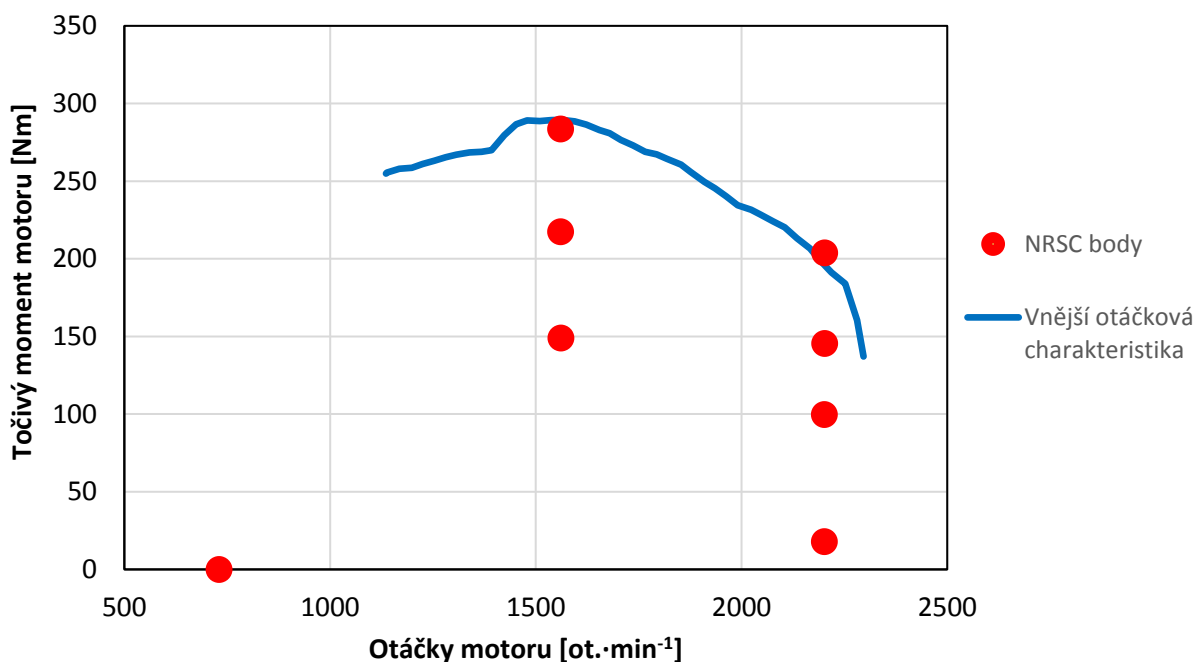
Tabulka 20 MN/SO/B v poměru 70/20/10 NRSC test – produkované emise

Číslo režimu	CO [g·h ⁻¹]	CO ₂ [g·h ⁻¹]	NO [g·h ⁻¹]	PM [g·h ⁻¹]	CO [g·kWh ⁻¹]	CO ₂ [g·kWh ⁻¹]	NO [g·kWh ⁻¹]	PM [g·kWh ⁻¹]
1	106,63	56793,41	346,92	14,73	2,18	1163,47	7,11	0,30
2	48,46	45685,54	251,79	4,77	1,37	1288,56	7,10	0,13
3	89,73	38018,88	155,48	3,83	3,59	1520,65	6,22	0,15
4	115,05	23448,06	51,97	4,32	21,98	4480,48	9,93	0,83
5	152,98	48493,14	379,92	21,16	3,21	1017,11	7,97	0,44
6	56,47	37749,16	318,02	4,32	1,55	1035,51	8,72	0,12
7	50,30	28078,66	218,79	2,47	2,04	1137,06	8,86	0,10
8	34,88	3014,51	24,52	0,27	-	-	-	-

5.5 Směs motorové nafty, slunečnicového oleje a butanolu v poměru 60/20/20

Poslední zkoumanou směsí bylo palivo obsahující 60 obj. % motorové nafty, 20 obj. % slunečnicového oleje a 20 obj. % butanolu. Vnější otáčková charakteristika a měřicí body NRSC testu, viz Obrázek 19. Otáčky, výkonové parametry a údaje o spotřebě testovaného motoru během jednotlivých režimů zkušebního testu jsou zachyceny v Tabulce 21, ze které lze vyčíst, že maximální hodnota spotřeby 16013,69 g·h⁻¹ byla změřena při jmenovitých otáčkách

a maximálním zatížení motoru. Minimální spotřeba paliva byla podle předpokladů opět v režimu č. 8, ve kterém byl chod motoru ustálený při volnoběžných otáčkách s nulovým zatížením. Nejnižší měrná spotřeba $279,47 \text{ g}\cdot\text{kWh}^{-1}$ byla pozorována v režimu č. 5. V průběhu celého zkušebního cyklu byla měla měrná spotřeba paliva $376,06 \text{ g}\cdot\text{kWh}^{-1}$.



Obrázek 19 Směs MN/SO/B v poměru 60/20/20 – vnější otáčková charakteristika motoru a NRSC měřicí body

Tabulka 21 MN/SO/B v poměru 60/20/20 NRSC test – charakteristika režimů a spotřeba paliva

Číslo režimu	Otáčky PTO [ot.·min ⁻¹]	Točivý moment PTO [Nm]	Otáčky motoru [ot.·min ⁻¹]	Točivý moment motoru [Nm]	Výkon motoru [kW]	Spotřeba paliva [g·h ⁻¹]	Měrná spotřeba paliva [g·kWh ⁻¹]
1	621,68	722,25	2202,63	203,85	47,02	16013,69	340,57
2	621,60	515,21	2202,32	145,42	33,54	12932,25	385,62
3	621,31	353,32	2201,31	99,72	22,99	10982,86	477,77
4	621,37	63,13	2201,52	17,82	4,11	6799,98	1655,27
5	440,37	1004,72	1560,24	283,58	46,33	12948,78	279,47
6	440,34	770,09	1560,13	217,35	35,51	10212,95	287,60
7	440,58	527,88	1560,98	148,99	24,36	7716,16	316,82
8	206,04	0,00	730,00	0,00	0,00	1546,75	-

Sledované složky emisí a hodnoty jejich produkce jsou souhrnně zachyceny, viz Tabulka 22. Emitované množství CO bylo nejvýraznější v režimu č. 4 a činilo 140,29 g·h⁻¹. V režimu č. 1 bylo produkováno 54922,49 g·h⁻¹ CO₂, což bylo nejvíce napříč všemi režimy NRSC testu. Co se týká hmotnostního průtoku 381,02 g·h⁻¹ NO, tak byly nejvyšší hodnoty zaznamenány v režimu č. 5. Největší tvorba PM o hodnotě 13,04 g·h⁻¹ byla zaznamenána taktéž v režimu č. 5. Měrná produkce sledovaných emisí v průběhu celého zkušební cyklu byla následující: CO 3,23 g·kWh⁻¹; CO₂ 1294,53 g·kWh⁻¹; NO 7,78 g·kWh⁻¹; PM 0,16 g·kWh⁻¹.

Tabulka 22 MN/SO/B v poměru 60/20/20 NRSC test – produkové emise

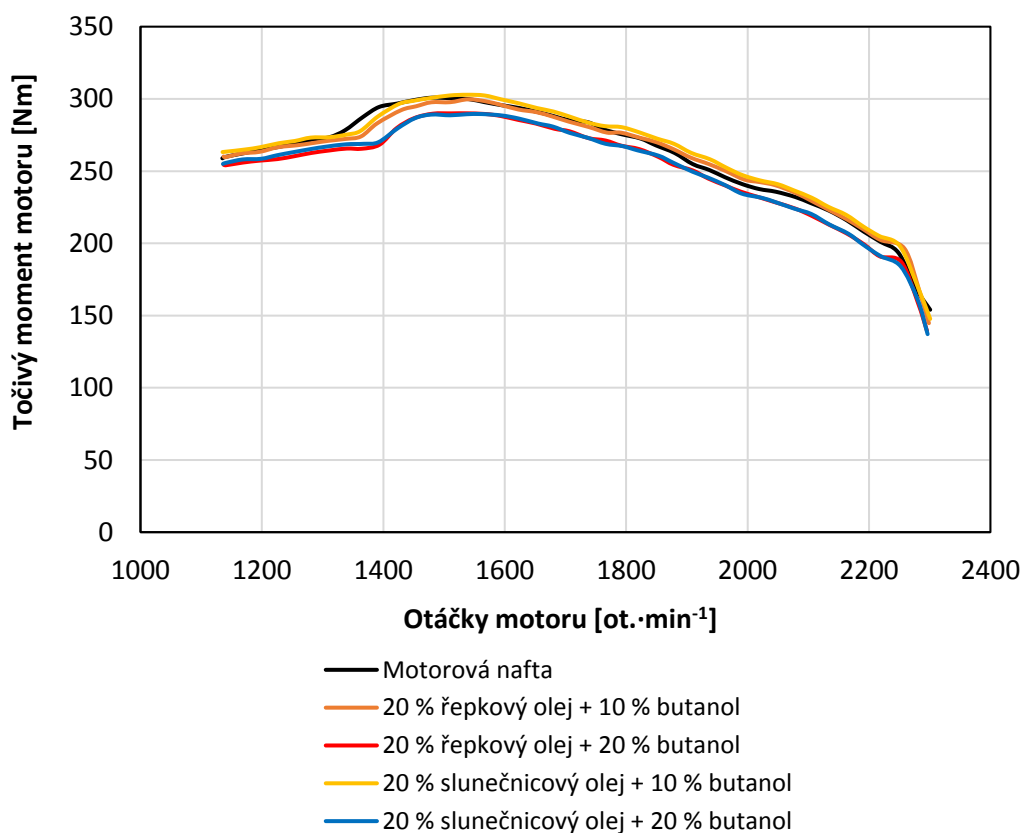
Číslo režimu	CO [g·h ⁻¹]	CO ₂ [g·h ⁻¹]	NO [g·h ⁻¹]	PM [g·h ⁻¹]	CO [g·kWh ⁻¹]	CO ₂ [g·kWh ⁻¹]	NO [g·kWh ⁻¹]	PM [g·kWh ⁻¹]
1	105,98	54922,49	333,80	8,86	2,25	1168,06	7,10	0,19
2	94,93	44281,82	237,86	2,78	2,83	1320,40	7,09	0,08
3	88,59	36886,18	145,93	2,90	3,85	1604,59	6,35	0,13
4	140,29	22354,82	55,39	2,32	34,15	54441,67	13,48	0,56
5	125,27	47731,02	381,02	13,04	2,70	1030,17	8,22	0,28
6	55,98	37291,57	309,98	2,28	1,58	1050,15	8,73	0,06
7	50,84	28012,33	206,65	1,59	2,09	1150,16	8,48	0,07
8	35,02	2888,53	25,52	0,23	-	-	-	-

5.6 Porovnání vlivu paliv na sledované parametry

V důsledku odlišných chemických vlastností jednotlivých paliv jsou očekávány změny provozních parametrů vznětového motoru při jejich spalování. V této části jsou vzájemně porovnány hodnoty parametrů, které byly získány v průběhu měření.

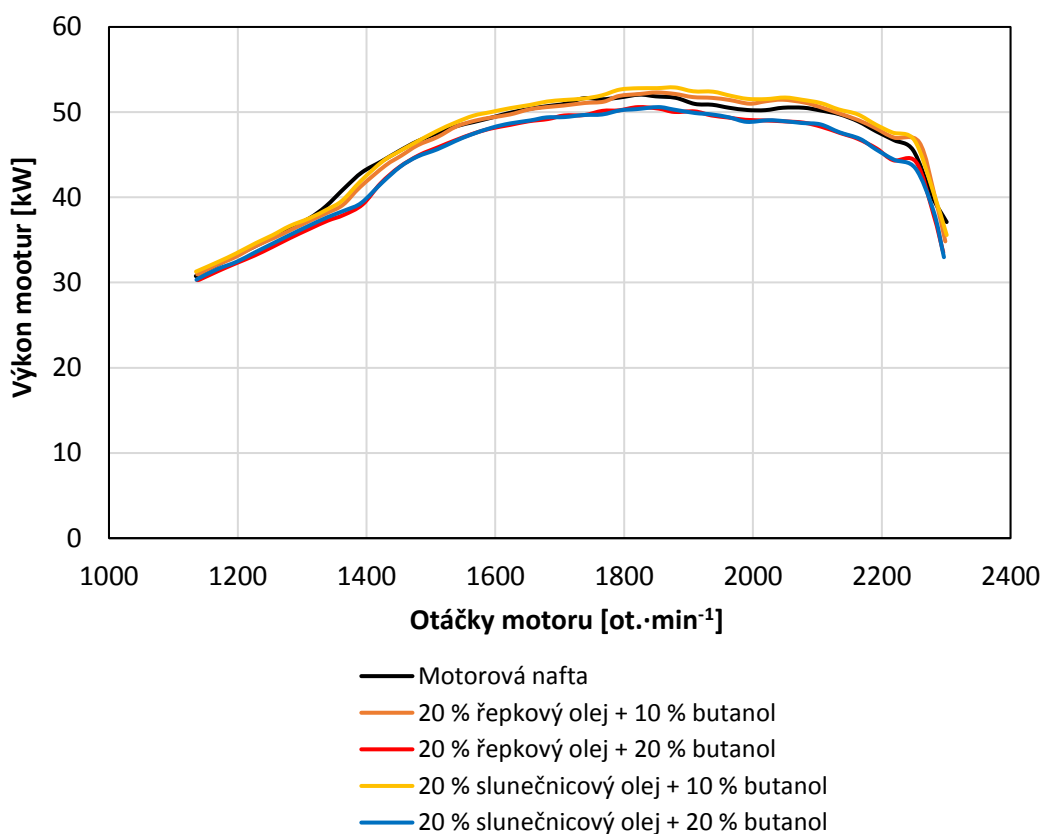
5.6.1 Výkonové parametry motoru

Druh použitého paliva se pochopitelně projeví i na vnější otáčkové charakteristice testovaného motoru. Křivky točivých momentů jsou vůči sobě porovnávány, viz Obrázek 20. Z vnější otáčkové charakteristiky je zřetelné, že výrazný pokles točivého momentu nastává při použití směsí, které obsahují 20 obj. % butanolu, a to v celém spektru otáček. Paliva se zastoupením 10 obj. % butanolu ve směsi vykazují při použití pro pohon motoru obdobné hodnoty točivých momentů v porovnání s provozem na čistou motorovou naftou. Mezi křivkami směsí s 10 obj. % butanolu a křivkou pro motorovou naftu je viditelný určitý nárůst hodnot točivého momentu v pásmu vysokých otáček od cca 1800 ot. \cdot min⁻¹ až po jmenovité otáčky motoru. Takto minimální rozdíly však mohou být způsobeny určitou nepřesností měřicího zařízení.



Obrázek 20 Vnější otáčková charakteristika – porovnání točivého momentu

U křivek průběhu výkonu motoru při použití vybraných paliv je pozorován obdobný trend jako u točivého momentu motoru. Křivky výkonu motoru, viz Obrázek 21. Ve spektru nízkých otáček nejsou pozorovány výrazné rozdíly mezi dosahovanými výkony, avšak od cca 1350 ot. \cdot min⁻¹ dochází k výraznému poklesu výkonu motoru při použití směsí s obsahem 20 obj. % butanolu. Tento rozdíl ve výkonu poté přetrvává až do maximálních otáček motoru. Co se týká směsí se zastoupením 10 obj. % butanolu, tak křivky výkonu víceméně kopírují průběh výkonu motorové nafty, nicméně od cca 1850 ot. \cdot min⁻¹, tedy ve spektru vysokých otáček motoru, je viditelný mírný nárůst výkonu motoru při použití této směsi. Stejně jako u hodnot točivého momentu však mohou být takto minimální rozdíly způsobeny určitou nepřesností měřicího zařízení.



Obrázek 21 Vnější otáčková charakteristika – porovnání výkonu

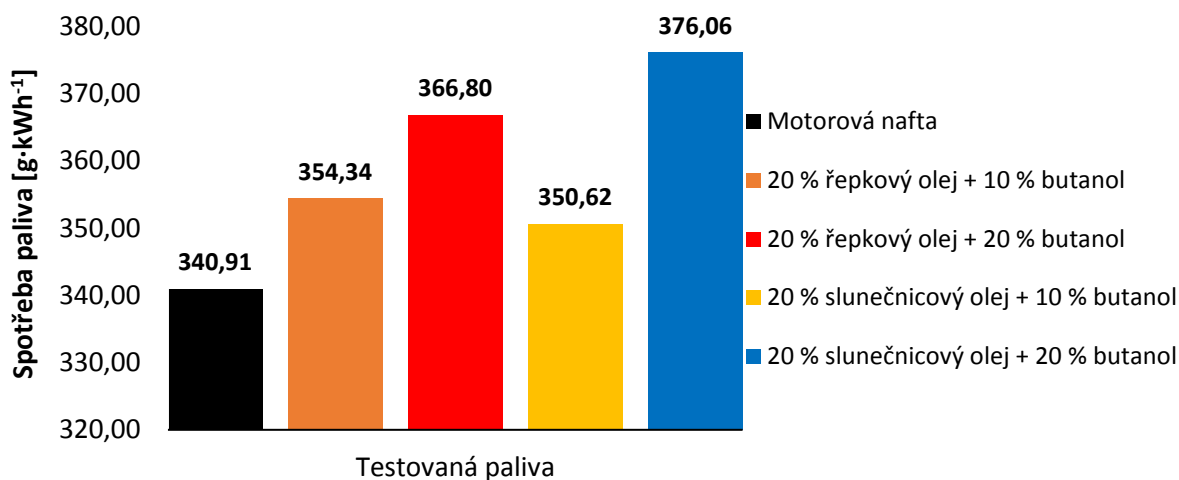
Porovnání maximálních hodnot výkonu je ke zhlédnutí v Tabulce 23. Z těchto hodnot je viditelný určitý pokles maximálních hodnot točivého momentu a výkonu motoru v případě, kdy jsou palivy směsí s obsahem 20 obj. % butanolu. Směs paliva s obsahem 20 obj. % slunečnicového oleje a 20 obj. % butanolu způsobuje pokles výkonu motoru o 2,80 % a pokles točivého momentu motoru o 3,76 %. V podstatě stejné maximální hodnoty výkonu i točivého momentu motoru při zohlednění přesnosti měření vykazuje pohonná jednotka při použití směsí, v nichž byl zastoupen butanol z 10 obj. %.

Tabulka 23 Porovnání maximálních výkonových parametrů

Palivo	Výkon [kW]	Otáčky [ot. \cdot min ⁻¹]	Točivý moment [Nm]	Otáčky [ot. \cdot min ⁻¹]
Motorová nafta	52,05	1824	300,82	1479
20 % řepkový olej 10 % butanol	52,31	1850	299,72	1540
20 % řepkový olej 20 % butanol	50,59	1822	290,01	1537
20 % slunečnicový olej 10 % butanol	52,90	1879	302,85	1538
20 % slunečnicový olej 20 % butanol	50,59	1853	289,5	1562

5.6.2 Spotřeba paliva

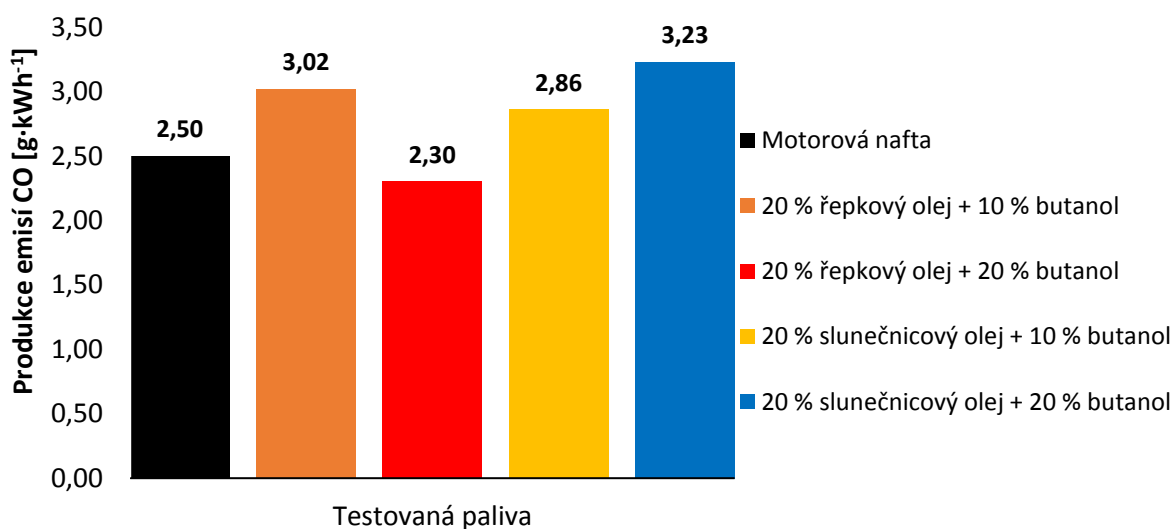
Přehled měrné spotřeby paliv za celý NRSC test, viz Obrázek 22. V porovnání s motorovou naftou je při použití ostatních testovaných paliv pozorován nárůst měrné spotřeby. Nejvyšší měrnou spotřebu vykazovala směs s obsahem 20 obj. % slunečnicového oleje a 20 obj. % butanolu, kdy byla její hodnota o 10,31 % vyšší než při provozu na motorovou naftu. Nejnižší hodnota měrné spotřeby mezi porovnávanými alternativními palivy byla vypočtena u směsi se zastoupením 20 obj. % slunečnicového oleje a 10 obj. % butanolu, nicméně její spotřeba byla o 2,85 % vyšší v porovnání s motorovou naftou. Na základě těchto výsledků lze pozorovat závislost, že s rostoucím podílem butanolu ve směsi, roste také měrná spotřeba paliva.



Obrázek 22 Spotřeba paliva za celý NRSC test

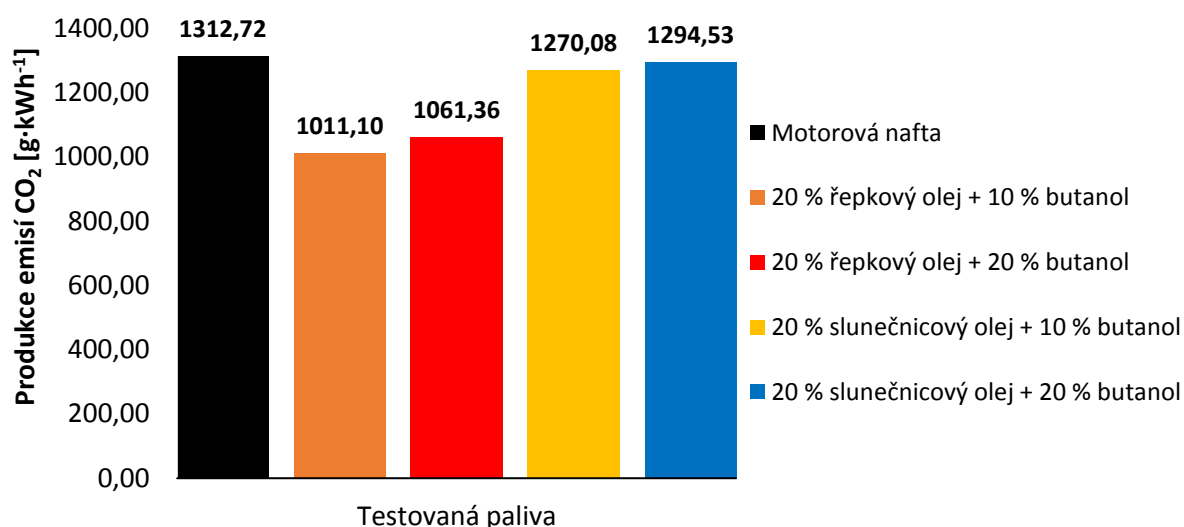
5.6.3 Produkce emisí CO, CO₂, NO a PM

Produkcí emisí CO za celý zkušební test lze vidět na Obrázku 23. Oproti motorové naftě vykazuje nejhorší výsledky směs skládající se z motorové nafty s 20 obj. % slunečnicového oleje a 20 obj. % butanolu, kde je pozorován nárůst emitovaného CO o 29,20 %. Překvapivě byl ale naměřen pokles produkce CO o 8,00 % při použití 20 obj. % řepkového oleje a 20 obj. % butanolu. Podle předpokladů by mělo být množství emitovaného CO u této směsi vyšší než u motorové nafty. Jedním z důvodů by měla být vyšší kinemtická viskozita alternativních paliv. S rostoucí hodnotou kinemtické viskozity se totiž zhoršuje kvalita rozprášení paliva, což má za následek vyšší tvorbu CO a HC. (9)



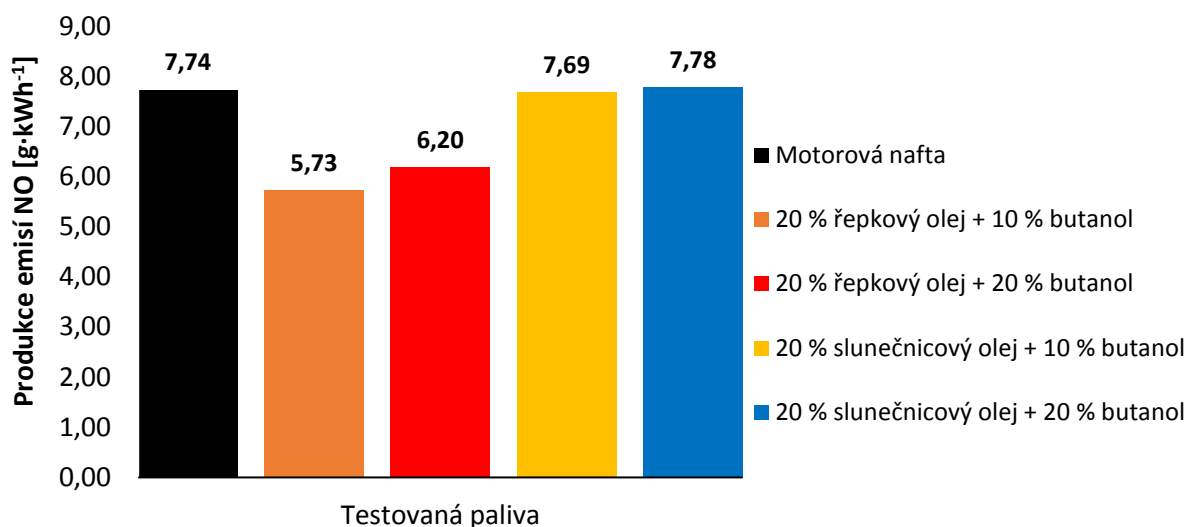
Obrázek 23 Produkce emisí CO za celý NRSC test

Vzájemné zhodnocení produkce emisí CO₂ je zachyceno, viz Obrázek 24. Při porovnání jednotlivých paliv se jako nejhorší jeví motorová nafta, při jejímž spalování vzniká 1312,72 g·kWh⁻¹ CO₂. Jako nejčistší palivo se z hlediska emitování této složky jeví směs s 20 obj. % řepkového oleje a 10 obj. % butanolu, při jejímž spalování je oproti motorové naftě do ovzduší uvolňováno o 22,98 % méně CO₂. U směsí obsahujících slunečnicový olej jsou viditelné horší výsledky než v případě těch, které obsahují řepkový olej. Konkrétně u směsi s obsahem 20 obj. % slunečnicového oleje a 20 obj. % butanolu činí pokles produkce emisí pouze 1,39 %.



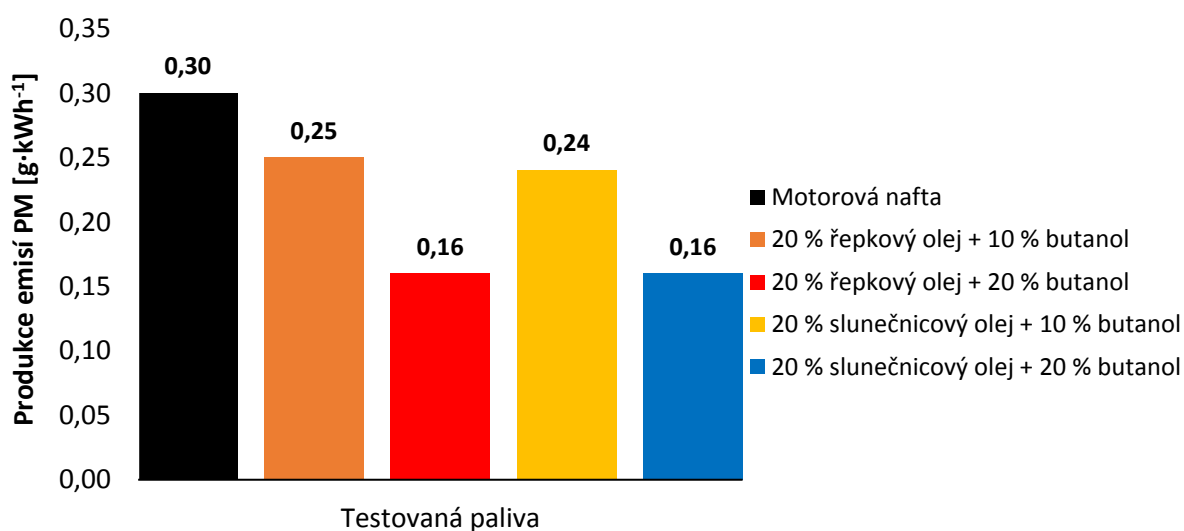
Obrázek 24 Produkce emisí CO₂ za celý NRSC test

Porovnání emitovaného NO lze vidět na Obrázku 25. Na základě výsledků lze říci, že srovnatelnou hodnotu emisí NO mají hned tři paliva. Hodnoty emisí NO při použití motorové nafty a obou směsí, ve kterých je obsažen slunečnicový olej, se vůči sobě liší o cca 0,50 %. Tato paliva se společně jeví jako nejhorší z celého testu. Naopak za nejlepší palivo u tohoto kritéria lze považovat směs motorové nafty a 20 obj. % řepkového oleje a 10 obj. % butanolu, která při spalování produkuje o 25,97 % méně NO než motorová nafta bez biosložky.



Obrázek 25 Produkce emisí NO za celý NRSC test

Pevné částice jsou velkým tématem diskuzí o znečišťování ovzduší, protože jejich emitování do atmosféry jde v některých případech rozpoznat již pouhým pohledem na koncovku výfuku vozidla. Porovnání produkce této složky při použití různých paliv lze zhlédnout, viz Obrázek 26. Oproti motorové naftě lze sledovat pokles v množství emitovaných pevných částic u všech alternativních paliv. Nejnižších hodnot dosahují směsi s 20 obj. % butanolu. Pokles emisí PM o 46,67 % je velmi znatelný a z tohoto hlediska představují všechny alternativní směsi jistý potenciál využití.



Obrázek 26 Produkce emisí PM za celý NRSC test

6 Ekonomické zhodnocení

Tématem této práce nebylo najít takový druh paliva, který by zajišťoval nejnižší náklady na provoz, nicméně ekonomické hledisko nelze v žádném případě opomenout. V první řadě je pro porovnání nákladů na provoz nezbytné stanovit pořizovací náklady na 1 litr paliva (ceny paliv jsou uváděny v současných tržních cenách). Pro účely tohoto experimentu byla použita motorová nafta bez biosložky, jejíž cena je oproti běžné motorové naftě s obsahem biosložky do 7 % o něco vyšší. V palivech s obsahem biosložky byly použity rostlinné oleje, které jsou určeny pro potravinářské účely a lze je koupit běžně v obchodech s potravinami. Biobutanol je v současné době považován spíše za palivo budoucnosti a kvůli jeho složité dostupnosti byl v testu použit n-butanol, který se v chemickém průmyslu používá jako analytické a extrakční činidlo. Tato látka byla zakoupena v ČR od společnosti Lach-Ner za cca 37 Kč·l⁻¹. Světové prodejní ceny butanolu se v současné době pohybují okolo 3,40 \$ za gallon, tzn. cca 20,40 Kč·l⁻¹. Stále rostoucí poptávka po butanolu a potenciál jeho širšího uplatnění jako biopaliva vedou společnosti k vývoji technologií pro zpracování biomasy a následně výrobě biobutanolu. Výrobní náklady biobutanolu získaného z pšeničné slámy by mohly být při zhodnocení vedlejších produktů získaných při jeho výrobě přibližně 2,15 \$ za gallon, tzn. cca 12,90 Kč·l⁻¹, což by z něj činilo pro bio-rafinerie nákladově zajímavý produkt s potenciálem k prodeji biobutanolu jako biopaliva 2. generace. (32)

Ceny komodit použitých v experimentu:

1. Motorová nafta bez biosložky	33,50 Kč·l ⁻¹
2. Slunečnicový olej	29,90 Kč·l ⁻¹
3. Řepkový olej	29,90 Kč·l ⁻¹
4. Butanol	37,00 Kč·l ⁻¹

Podle zákona č. 353/2003 § 46 vzniká povinnost přiznat a zaplatit spotřební daň z minerálních olejů. S výjimkou ceny motorové nafty, která již tuto daň obsahuje, je tedy nezbytné do cen komodit zahrnout i tuto část nákladů. Spotřební daň pro řepkový a slunečnicový olej je stanovena na 1,61 Kč·l⁻¹. Butanol, který je v tomto případě používán jako přísada do motorové nafty a rostlinného oleje, musí být podle zákona č. 353/2003 § 49 zdaněn vyšší sazbou spotřební daně minerálního oleje obsaženého ve směsi. V případě testovaných směsí by to pro butanol byla sazba spotřební daně motorové nafty, která je 10,95 Kč·l⁻¹.

Ceny komodit včetně spotřební daně:

1. Motorová nafta bez biosložky	33,50 Kč·l ⁻¹
2. Slunečnicový olej	31,51 Kč·l ⁻¹
3. Řepkový olej	31,51 Kč·l ⁻¹
4. Butanol	47,95 Kč·l ⁻¹

Cenu jednotlivých paliv lze vypočítat na základě jejich objemového podílu ve směsi. Při výpočtu celkových nákladů na provoz je však nezbytné zohlednit jejich objemovou hmotnost a také spotřebu pohonných hmot při určitých provozních podmínkách. Cena motorové nafty bez příměsí je tedy 33,50 Kč·l⁻¹. Cena směsi motorové nafty s 20 obj. % řepkového/slunečnicového oleje a 10 obj. % butanolu je 34,55 Kč·l⁻¹. Cena směsi motorové nafty s 20 obj. % řepkového /slunečnicového oleje a 20 obj. % butanolu je 35,99 Kč·l⁻¹. Na základě těchto cen je z hlediska pořizovacích nákladů jasně nejvýhodnější palivem čistá motorová nafta, nicméně k objektivnímu porovnání nákladů na provoz vozidla, je třeba přihlídnout také ke spotřebě paliva [l·h⁻¹] v reálném provozu a následně stanovit cenu za hodinu provozu [Kč·h⁻¹].

Hustota paliv použitých v experimentu při 15 °C:

1. Motorová nafta bez biosložky	819,23 kg·m ⁻³
2. ŘO20_BUT10	842,80 kg·m ⁻³
3. ŘO20_BUT20	836,58 kg·m ⁻³
4. SO20_BUT10	837,10 kg·m ⁻³
5. SO20_BUT20	836,35 kg·m ⁻³

Při výpočtu objemové spotřeby paliva za celý NRSC test (Q_{hNRSC}) jsou použity hodnoty získané při provádění NRSC zkušebního testu, který simuluje charakteristické provozní podmínky traktorového motoru. Do rovnice 11 jsou dosazeny hodnoty hmotnostní hodinové spotřeby (M_p), které byly zaznamenány při NRSC testu v jednotlivých testovacích režimech. Hodnotám spotřeby jsou přiřazeny váhové faktory (VF), viz Tabulka 12. Výsledná hodnota Q_{hNRSC} je získána na základě známé hustoty paliva (ρ_P). Výsledné hodnoty spotřeby jednotlivých paliv jsou uvedeny, viz Tabulka 24. V této tabulce je také uvedena hodnota celkových nákladů na pohonné hmoty spotřebovaných při jedné směně, za předpokladu, že by traktor nepřetržitě pracoval. Při provozu na motorovou naftu činila spotřeba 11,50 l·h⁻¹. Náklady na spotřebovanou motorovou naftu byly 385,14 Kč h⁻¹, resp. 3081,14 Kč/směnu. Nejnižší objemovou spotřebu nicméně vykazala směs s 20 obj. % řepkového oleje a 20 obj. % butanolu, jejíž hodnota byla

11,46 l·h⁻¹. Náklady na provoz by při použití této směsi však byly 412,34 Kč·h⁻¹, resp. 3298,75 Kč/směnu. V případě směsi s 20 obj. % slunečnicového oleje a 20 obj. % butanolu byly náklady dokonce 429,85 Kč·h⁻¹, resp. 3438,83 Kč/směnu. S přihlédnutím k těmto výsledkům se nabízí jasná odpověď, že směsi s obsahem butanolu nejsou v současné době z hlediska nákladů na provoz perspektivní. Pokud je navíc přihlédnuto i k faktu, že při provozu na paliva s vyšším obsahem butanolu dochází k výraznému poklesu výkonových parametrů motoru v celém spektru otáček a k nárůstu měrné spotřeby o 7,59 %, tak se tato paliva jeví jako nevhodná. Je dokonce možné, že na určité operace, při kterých jsou kladeny vysoké nároky na výkonové parametry traktoru, by bylo potřeba využít silnějšího traktoru, u kterého by pravděpodobně byly také vyšší náklady na spotřebované pohonné hmoty.

$$Q_{hNRSC} = \frac{\sum_{i=1}^8 (M_{p,i} \cdot VF_i)}{\rho_P} \cdot 1000 \quad (11)$$

Tabulka 24 Výpočet nákladů na provoz traktoru

Palivo	Objemová spotřeba [l·h⁻¹]	Náklady na palivo [Kč·h⁻¹]	Náklady na palivo na 8 hodin provozu [Kč/směnu]
Motorová nafta	11,50	385,14	3081,14
20 % řepkový olej 10 % butanol	11,49	397,04	3176,30
20 % řepkový olej 20 % butanol	11,46	412,34	3298,75
20 % slunečnicový olej 10 % butanol	11,64	402,25	3218,03
20 % slunečnicový olej 20 % butanol	11,94	429,85	3438,83

7 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo určit jakým způsobem jsou ovlivňovány provozní parametry vznětového motoru při použití čtyř alternativních druhů paliv. Problematika snížení závislosti na fosilních palivech prostřednictvím biopaliv získaných z obnovitelných zdrojů je velmi aktuálním tématem. Již po několik let jsou na území ČR do motorové nafty ze zákona přidávány metylestery rostlinných olejů. Potencionálních možností, jak v určité míře bez zásahu do konstrukce vznětového motoru nahradit konvenční paliva prostřednictvím biopaliv, je však více. V rámci experimentu, který byl prováděn ve zkušebně Katedry jakosti a spolehlivosti strojů v prostorách České zemědělské univerzity v Praze, byly pro pohon traktoru Zetor Forterra 8641 použity směsi paliv skládající se z motorové nafty s přídavkem řepkového oleje a butanolu, resp. slunečnicového oleje a butanolu. Poměr zastoupení jednotlivých složek byl takový, že ve směsi vždy převažovala motorová nafta, která byla doplněna 20 obj. % čistého rostlinného oleje a 10 nebo 20 obj. % butanolu. Jednalo se tedy o směsi s vysokým obsahem biosložky. Při použití motorové nafty s vyšším procentem zastoupení rostlinného oleje by v důsledku jeho vysoké viskozity mohlo docházet zejména při nižších venkovních teplotách k nežádoucímu ovlivnění dopravy paliva do vstřikovacího zařízení motoru a zhoršení kvality tvorby směsi ve válci. Z tohoto důvodu je do paliva přimícháván jako aditivum butanol, který je možné vyrábět z obnovitelných zdrojů. Přidáním butanolu do směsi lze tedy ještě zvýšit procentuální zastoupení biosložky ve směsi, což je při snahách o snižování závislosti na fosilních palivech pozitivní skutečností.

V první části práce byla ve stručnosti shrnuta historie vznětových motorů a dále byly podrobně popsány principy fungování těchto motorů. Pozornost byla věnována také nežádoucím produktům spalování a zařízením pro úpravu výfukových plynů. Velká část literární rešerše byla věnována možnostem nahrazení motorové nafty jako paliva vznětových motorů využitím kapalných biopaliv. V závěrečné fázi byly představeny metody měření provozních parametrů vozidel.

V praktické části práce jsou hodnoceny a vzájemně porovnávány vlivy jednotlivých paliv na následující parametry: točivý moment motoru, výkon motoru, spotřeba paliva a dále produkce CO, CO₂, NO a PM. Měření těchto parametrů probíhalo při NRSC zkušebním testu, který simuluje podmínky běžného provozu traktoru. Etanolem kvality, vůči kterému byly porovnávány změny provozních parametrů motoru při pohonu na experimentální směsi se zastoupením biosložky, byla čistá motorová nafta.

Při měření točivého momentu a výkonu motoru bylo zjištěno, že použití směsí s obsahem 20 obj. % butanolu mají za následek určitý pokles výkonových parametrů v celém spektru otáček. Nejnížší hodnoty vykazovala směs s obsahem 20 obj. % slunečnicového oleje a 20 obj. % butanolu, kdy byl v porovnání s pohonem na motorovou naftu o 2,80 % nižší maximální výkon a o 3,76 % nižší maximální točivý moment. Naopak u směsí obsahujících 20 obj. % rostlinného oleje a 10 obj. % butanolu byly výkonové parametry srovnatelné s provozem na motorovou naftu bez biosložky. Měrná spotřeba paliva byla podle očekávání nejnižší u motorové nafty.

Podle předpokladů byly u alternativních směsí zaznamenány vyšší hodnoty tvorby CO, a to řádově o 14 % a více. Výjimkou byla pouze směs skládající se z motorové nafty s 20 obj. % řepkového oleje a 20 obj. % butanolu, kde byl překvapivě naměřen pokles produkce CO o 8,00 %, což lze s největší pravděpodobností přisoudit chybě měření. Při pohledu na hodnoty produkovaného CO₂ lze říci, že při použití alternativních směsí dochází k poklesu tvorby CO₂. Nejlepší výsledky s redukcí emitování této složky o 22,98 % vykazovala směs s obsahem 20 obj. % řepkového oleje a 10 obj. % butanolu. Tuto směs lze považovat za nejlepší palivo i z pohledu emitování NO, kterého při spalování produkuje o 25,97 % méně než motorová nafta bez biosložky. Z pohledu posledního testovaného parametru, kterým byla emise PM, jsou všechny testované směsi lepší než motorová nafta. Nejvyšší pokles produkovaných PM byl zaznamenán shodně u směsí motorové nafty s přísadou 20 obj. % řepkového, resp. slunečnicového oleje a 20 obj. % butanolu. Tyto směsi vykazovaly o 46,67 % nižší emisi PM.

Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že jako nejlepší z testovaných paliv, kterým lze částečně omezit spotřebu fosilního paliva při provozu vznětového spalovacího motoru, je směs motorové nafty s obsahem 20 obj. % řepkového oleje a 10 obj. % butanolu. Mírně zvýšené hodnoty produkce CO je možné snížit implementováním oxidačního katalyzátoru do výfukového systému traktoru. Tímto zařízením jsou však ve většině případů moderní traktory vybaveny již z výroby.

Pokud by však byla jednotlivá paliva posuzována podle nákladů na provoz, tak se při současných cenách vstupních surovin nejeví alternativní směsi jako ekonomicky výhodné. Při použití všech alternativních směsí byly totiž sledovány vyšší náklady na provoz v porovnání s motorovou naftou. Nicméně jako nejperspektivnější alternativní palivo se opět jevila směs motorové nafty s obsahem 20 obj. % řepkového oleje a 10 obj. % butanolu, u níž byly náklady na provoz pouze o 3,09 % vyšší než u motorové nafty.

8 Použitá literatura

1. HROMÁDKO, Jan, aj. *Spalovací motory*. Praha: GRADA, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.
2. RAUSCHNER, Jaroslav. Ústav automobilového a dopravního inženýrství. *Vysoké učení technické v Brně* [online]. [cit. 8.11.2018]. Dostupné z: <http://www.iae.fme.vutbr.cz/userfiles/ramik/files/Spalovaci%20motory%202005.pdf>
3. FERENC, Bohumil. *Spalovací motory: Karburátory a vstřikování paliva*. Praha: Computer Press, 2004. ISBN 80-251-0207-6.
4. Čtyřdobý vznětový motor (Diesel). *Fyzweb* [online]. [cit. 8.11.2018]. Dostupné z: <http://www.fyzweb.cz/materialy/tabulky/detail.php?id=204>
5. Pístové spalovací motory zážehové a vznětové. *sps-ko* [online]. [cit.: 10.11.2018]. Dostupné z: http://www.sps-ko.cz/documents/SPS_prazak/18%2019%20P%C3%8DSTOV%C3%89%20SPALOVAC%C3%8D%20MOTORY.pdf
6. ŠPAČEK, Martin. *Měření parametrů vstřikování Common Rail*. Brno, 2010. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně.
7. Vstřikovací systém Common Rail. *ELUC* [online]. [cit.: 10.11.2018]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1469>
8. STROUHAL, Pavel. *Aplikace vysokotlakého palivového systému na vznětový motor*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké technické učení v Brně.
9. ŠMERDA, Tomáš, ČUPERA, Jiří a FAJMAN, Martin. *Vznětové motory vozidel: Biopaliva, emise, traktory*. Brno: CPress, 2013. ISBN 978-80-264-0160-5.
10. Takáts, Michal. *Měření emisí spalovacích motorů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01632-3.
11. LEE, Sunggyu a SHAH, Yatish T. *Biofuels and bioenergy: Processes and technologies*. Ohio: CRC Press, 2013. ISBN 978-1-4200-8955-4.
12. Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/28/ES. *EUR-Lex* [online]. [cit. 14.11.2018]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?qid=1542376953731&uri=CELEX:32009L0028>

13. PODOLSKÝ, David. *Provnání řepkového a slunečnicového oleje jako paliva*. Praha, 2018. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.
14. HROMÁDKO, Jan a MILER, Petr. Princip kontroly plnění kritérií udržitelnosti biopaliv. *Listy cukrovarnické a řepařské*. 2011, **127**(7/8), 256-260. ISSN 1210-3306.
15. DUCHOŇ, Bedřich. Záměry EU v oblasti biopaliv a realita v České republice. *Doprava*. 2010, **52**(2), 3-5. ISSN 0012-5520.
16. Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší.
17. Zákon č. 353/2003 Sb., o spotřebních daních.
18. ČSN EN 14214+A1. *Kapalné ropné výrobky – Methylestery mastných kyselin (FAME) pro vznětové motory a topné oleje – Technické požadavky a metody zkoušení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
19. MÜLLER, Miroslav, aj. Hodnocení mechanických vlastností elastomerního těsnění pro palivové soustavy vystavené vlivu biopaliv. *Listy cukrovarnické a řepařské*. 2016, **132**(11), 350-355. ISSN 1210-3306
20. ČSN EN 590+A1. *Motorová paliva – Motorové nafty – Technické požadavky a metody zkoušení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
21. ČSN 65 6508. *Motorová paliva – Směsné motorové nafty obsahující methylestery mastných kyselin (FAME) – Technické požadavky a metody zkoušení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
22. HROMÁDKO, Jan, aj. Technologie výroby biopaliv druhé generace. *Chemické listy* [online]. 2010, **104**(8), 784-790 [cit. 22.11.2018]. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/1272>
23. HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilových škol*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.
24. FRANCO, Z. a NGUYEN, Q. D. Flow properties of vegetable oil–diesel fuel blends. *FUEL* [online]. 2011, **90**(2), 838-843 [cit. 6.3.2019]. ISSN 0016-2361. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236110005156?via%3Dihub>

25. ČEDÍK, Jakub, aj. Influence of butanol and FAME blends on operational characteristics of compression ignition engine. *Agronomy Research* [online]. 2015, **13**(2), 541-549 [cit. 22.11.2018]. ISSN 1406-894X. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/281789309_Influence_of_butanol_and_FAME_blends_on_operational_characteristics_of_compression_ignition_engine
26. SLADKÝ, Václav. Biobutanol – vhodnější náhrada benzínu. *Biom.cz* [online]. [cit. 25.11.2018]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/biobutanol-vhodnejsi-nahrada-benzinu>
27. JEEVAHAN, Jeya, aj. Experimental investigation of the suitability of 1-butanol blended with biodiesel as an alternative biofuel in diesel engines. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* [online]. 2018, **22**, 72-77 [cit. 25.11.2018]. ISSN 1878-8181. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878818118300720?via%3Dihub>
28. YUQIANG, Li, aj. Potential of acetone-butanol-ethanol (ABE) as a biofuel. *FUEL* [online]. 2019, **242**, 673-686 [cit. 25.2.2019]. ISSN 0016-2361. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236119300638?via%3Dihub>
29. TIE, Li. Effects of ethyl tert-butyl ether addition to diesel fuel on characteristics of combustion and exhaust emissions of diesel engines. *FUEL* [online]. 2009, **88**(10), 2017-2024 [cit. 27.11.2018]. ISSN 0016-2361. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236109001070?via%3Dihub>
30. KUMAR, Rajesh B a SARAVANAN, S. Use of higher alcohol biofuels in diesel engines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, **60**, 84-115 [cit. 5.12.2018]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116001155?via%3Dihub>
31. HROMÁDKO, Jan, aj. Využití bioethanolu jako paliva ve spalovacích motorech. *Chemické listy*. [online]. 2011, **105**(2), 122-128 [cit. 25.11.2018]. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/1180>
32. CHENG, Jay. *Biomass to Renewable Energy processes* [online]. 2nd ed. New York: CRC Press, 2017 [cit. 9.2.2019]. ISBN 9781498778855. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=impQDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs&source=gs_bse_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

33. LANE, Jim. Enerkem produces a new clean, renewable alternative solution to diesel fuel for the transportation sector. In: *BiofuelsDigest.com* [online]. 25.9.2018 [cit. 29.11.2018]. Dostupné z: <http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2018/09/25/enerkem-produces-a-new-clean-renewable-alternative-solution-to-diesel-fuel-for-the-transportation-sector/>
34. ALAM, Firoz, aj. Third Generation Biofuel from Algae. *Procedia Engineering* [online]. 2015, **105**, 763-768 [cit. 22.11.2018]. ISSN 1877-7058. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815008656>
35. Bionafta v zemědělských strojích. *PREOL.cz* [online]. [cit. 23.11.2018]. Dostupné z: <https://www.preol.cz/info-pro-verejnost/bionafta-v-zemedelskych-strojich>
36. PEXA, Martin, aj. Lignocellulosic Biobutanol as Fuel for Diesel Engines. *BioResources* [online]. 2016, **11**(1), 6006-6016 [cit. 10.2.2019]. ISSN 1930-2126. Dostupné z: http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_11_3_6006_Pexa_Lignocellulosic_Biobutanol_Fuel_Diesel
37. KUBÍN, Karel a PEXA, Martin. Spotřeba paliva s podílem MEŘO u traktorového motoru. *Mechanizace zemědělství* [online]. 2011, **61**(3), 74-78. ISSN 0373-6776. Dostupné z: http://svtpisek.cz/VUZT1/index.php?P=P2011_25
38. ISO 8178. *DieselNet.cz* [online]. [cit. 10.2.2019]. Dostupné z: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/iso8178.php>
39. Zetor Forterra Turbo 8641-11741. *AGportal.cz* [online]. [cit. 9.2.2019]. Dostupné z: http://www.agportal.cz/files/user/zetor/Forterra_Z_8641-Z11741.pdf
40. ZW-500. *maha.co.uk* [online]. [cit. 9.2.2019]. Dostupné z: <https://www.maha.co.uk/power-take-off-dynamometer-lps-zw-500.htm>
41. laboratorní váhy. *GAPA.cz* [online]. [cit. 9.2.2019]. Dostupné z: <http://www.gapa-vahy.cz/produkty-laboratorni-vaha-vibra-aj-6200ce-detail-8003>
42. Macek, Jan. *Spalovací motory I*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03618-1.

9 Slovník pojmů

% (m/m)	hmotnostní procento
% (V/V)	objemové procento
A/D	analogově digitální
AFME	metylester z odpadních živočišných tuků a lojů
B100	bionafta
B30	motorová nafta s obsahem max. 30 obj. % biosložky
B7	motorová nafta s obsahem max. 7 obj. % biosložky
BTL	zpracování biomasy na kapalinu
CLA	chemiluminiscenční analyzátor
CO	oxid uhelnatý
CO ₂	oxid uhličitý
ČH	čtená hodnota
ČSN	Česká technická norma
DOC	oxidační katalyzátor
DPF	filtr pevných částic
DPH	daň z přidané hodnoty
DÚ	dolní úvrat'
EGR	Recirkulace výfukových plynů
ETBE	etyl tert-butyl éter
EURO	emisní norma evropské unie
FAME	metylestery mastných kyselin
FID	plamenoionizační detektor
FT syntéza	Fisher–Tropschova syntéza
GHG	skleníkové plyny
H ₂ O	voda
HC	uhlovodíky
HE _i	hmotnostní průtok složky v režimu <i>i</i>
HÚ	horní úvrat'
ISCC	certifikát udržitelnosti biopaliv
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
k	absorpční koeficient
L	délka optické dráhy
L _{vt}	teoretické množství suchého vzduchu potřebného k dokonalé oxidaci paliva
mb/d	milión barelů za den
MEŘO	metylester řepkového oleje
m _{NRSC}	měrná spotřeba paliva v průběhu NRSC testu
M _p	hmotnost paliva ve směsi
M _{P,i}	hmotnostní hodinová spotřeba režimu <i>i</i>
MPa	megapascal
M _v	hmotnost suchého vzduchu ve směsi

N	lineární stupeň absorpce
N ₂	dusík
N ₂ O	oxid dusný
NDIRA	bezdisperzní infraanalyzátor
NH ₃	amoniak
NO ₂	oxid dusičitý
NO _x	oxidy dusíku
NRSC	Non road steady cycle
O ₂	kyslík
O ₃	ozón
PAH	polycyklické aromatické uhlovodíky
PM	pevné částice
ppm	počet částic na jeden milion
P _{PTO,i}	výkon motoru na vývodovém hřídeli
PTO	vývodový hřídel
p-V	diagram pracovního oběhu motoru
Q	teplo
Q _{hNRSC}	objemové spotřeby paliva za celý NRSC test
REDcer	certifikát udržitelnosti biopaliv
RME	metylester řepkového oleje
SCR	selektivní katalytická redukce
SE _{NRSC}	specifická emise měřené složky v průběhu NRSC testu
SME	metylester slunečnicového oleje
SOME	metylester ze sojových bobů
V _{F,i}	váhový faktor režimu <i>i</i>
V _k	kompresní objem
VUOME	metylester z použitých fritovacích olejů
V _z	zdvihový objem
z	zdvih
ε	kompresní poměr
η _e	celková účinnost motoru
λ	součinitel přebytku vzduchu
ρ _P	hustota paliva

10 Seznam obrázků

Obrázek 1 Činnost čtyřdobého vznětového motoru (4).....	4
Obrázek 2 Pohyb pístu (3).....	5
Obrázek 3 Indikátorový diagram (5).....	6
Obrázek 4 Palivová soustava vstřikovacího systému Bosch CP4 (7).....	7
Obrázek 5 Složení výfukových plynů vznětového motoru (1).....	10
Obrázek 6 Potenciál snížení emisí biopalivy (22).....	17
Obrázek 7 Schéma výroby metylesteru řepkového oleje (23).....	19
Obrázek 8 Schéma výroby bioethanolu z biomasy obsahující jednoduché cukry, resp. škrob (31).....	20
Obrázek 9 Schéma výroby bioethanolu z lignocelulózové biomasy (31).....	22
Obrázek 10 Schéma měřicího systému (36).....	32
Obrázek 11 Zetor Forterra 8641 (Zdroj: autor).....	36
Obrázek 12 Dynamometr MAHA ZW-500 (Zdroj: autor).....	37
Obrázek 13 Váha VIBRA AJ-6200 (41).....	38
Obrázek 14 Měřicí sestava pro analýzu spalin (Zdroj: autor).....	39
Obrázek 15 Motorová nafta – vnější otáčková charakteristika motoru a NRSC měřicí body .	40
Obrázek 16 Směs MN/ŘO/B v poměru 70/20/10 – vnější otáčková charakteristika motoru a NRSC měřicí body	42
Obrázek 17 Směs MN/ŘO/B v poměru 60/20/20 – vnější otáčková charakteristika motoru a NRSC měřicí body	44
Obrázek 18 Směs MN/SO/B v poměru 70/20/10 – vnější otáčková charakteristika motoru a NRSC měřicí body	45
Obrázek 19 Směs MN/SO/B v poměru 60/20/20 – vnější otáčková charakteristika motoru a NRSC měřicí body	47
Obrázek 20 Vnější otáčková charakteristika – porovnání točivého momentu	49
Obrázek 21 Vnější otáčková charakteristika – porovnání výkonu	50
Obrázek 22 Spotřeba paliva za celý NRSC test	52
Obrázek 23 Produkce emisí CO za celý NRSC test	52
Obrázek 24 Produkce emisí CO ₂ za celý NRSC test.....	53
Obrázek 25 Produkce emisí NO za celý NRSC test.....	54
Obrázek 26 Produkce emisí PM za celý NRSC test.....	54

11 Seznam tabulek

Tabulka 1 Celosvětová spotřeba ropy a jiných kapalných paliv (Zpracováno podle) (11).....	13
Tabulka 2 Technické požadavky na FAME (Přepřacováno podle) (18).....	15
Tabulka 3 Technické požadavky na motorovou naftu (Přepřacováno podle) (20)	16
Tabulka 4 Technické požadavky na směšnou motorovou naftu B30 (Přepřacováno podle) (21)	16
Tabulka 5 Porovnání kinematické viskozity (Převzato) (23)	18
Tabulka 6 Porovnání zdrojů biomasy (Převzato) (34).....	23
Tabulka 7 Metody měření výkonových parametrů spalovacích motorů (Převzato) (1).....	26
Tabulka 8 NRSC test (Převzato) (37).....	33
Tabulka 9 Technická specifikace traktoru Z 8641 (Zpracováno podle) (39).....	36
Tabulka 10 Technické parametry MAHA ZW-500 (Zpracováno podle) (40)	37
Tabulka 11 Technické parametry váhy VIBRA AJ-6200 (Zpracováno podle) (41).....	37
Tabulka 12 Technické parametry analyzátorů BrainBee AGS-200 a OPA-100 (Převzato) (36)	38
Tabulka 13 Motorová nafta NRSC test – charakteristika režimů a spotřeba paliva.....	41
Tabulka 14 Motorová nafta NRSC test – produkované emise	41
Tabulka 15 MN/ŘO/B v poměru 70/20/10 NRSC test – charakteristika režimů a spotřeba paliva	42
Tabulka 16 MN/ŘO/B v poměru 70/20/10 NRSC test – produkované emise.....	43
Tabulka 17 MN/ŘO/B v poměru 60/20/20 NRSC test – charakteristika režimů a spotřeba paliva	44
Tabulka 18 MN/ŘO/B v poměru 60/20/20 NRSC test – produkované emise.....	45
Tabulka 19 MN/SO/B v poměru 70/20/10 NRSC test – charakteristika režimů a spotřeba paliva	46
Tabulka 20 MN/SO/B v poměru 70/20/10 NRSC test – produkované emise	46
Tabulka 21 MN/SO/B v poměru 60/20/20 NRSC test – charakteristika režimů a spotřeba paliva	47
Tabulka 22 MN/SO/B v poměru 60/20/20 NRSC test – produkované emise	48
Tabulka 23 Porovnání maximálních výkonových parametrů.....	51
Tabulka 24 Výpočet nákladů na provoz traktoru	57

12 Seznam příloh

Příloha 1

Technické parametry paliv

Hustota

Hustotou je definována hmota připadající na jednotku objemu, která však s rostoucí teplotou klesá, protože dochází ke zvětšování objemu kapaliny. Hodnota hustoty se u jednotlivých paliv liší, a proto je nutné brát v potaz především výhřevnost konkrétního paliva. Hodnota výhřevnosti má velký význam především u starších konstrukcí motorů s řadovými čerpadly, kdy byla dávka paliva určována zdvihovým objemem pístu čerpadla. U moderních motorů je dávka vstřikovaného paliva určována pokyny z řídicí jednotky. Prodloužením vstřiku může být například kompenzován pokles hustoty paliva, která nastane v důsledku nárůstu teploty. (9)

Výhřevnost

Výhřevnost vyjadřuje množství energie uvolněné shořením získané z objemové [MJ/l] nebo hmotnostní [MJ/kg] jednotky daného paliva. Výhřevnost paliva je závislá na obsahu hlavních hořlavých prvků, které jsou představovány vodíkem a uhlíkem. (9)

Bod vzplanutí a teplota vznícení

Bod vzplanutí vyjadřuje nejnižší teplotu hořlavé kapaliny, která je nutná pro zapálení par nad hladinou této kapaliny s využitím vnějšího zápalného zdroje, podle ČSN 65 0201. Bod vzplanutí má význam především při manipulaci s palivem, jeho skladování a u zážehových motorů, kde dochází k zapálení směsi od zapalovací svíčky. (9)

Teplota vznícení představuje nejnižší teplotu, při které se směs par se vzduchem vznítí bez cizího činitele. Teplota vznícení má význam především u vznětových motorů, ve kterých dochází k zažehnutí směsi bez zapalovací svíčky. (9)

Kinematická viskozita

Kinematická viskozita představuje velikost vnitřního tření kapaliny, kdy hodnoty této veličiny jsou závislé na teplotě a tlaku. Kinematická viskozita hraje důležitou roli při průchodu paliva palivovou soustavou. Vysoká kinematická viskozita má negativní vliv na čerpání, filtrování a vstřikování paliva. Od hodnoty kinematické viskozity se při vstřikování odvíjí spektrum rozdělení kapiček paliva, kdy se s rostoucí hodnotou viskozity zvětšuje průměr kapky paliva.

Tento jev má negativní vliv na kvalitu spalování paliva. s čímž jsou spojeny větší emise pevných částic HC a CO. (9)

Destilační křivka

Destilační křivkou je zachycen průběh přeměny paliva z kapalného do plynného stavu s rostoucí teplotou. Průběhy destilačních křivek jednotlivých paliv se odlišují, a aby mohlo dojít ke vznícení paliva, tak musí být predestilováno minimálně 10 % paliva. U různých paliv se teplota dosažení 10% bodu liší, avšak platí to, že čím je tato teplota vyšší, tím jsou náročnější podmínky pro vznícení směsi. (9)

Cetanové číslo

Cetanovým číslem se hodnotí tzv. náchylnost k samovznícení. Hodnota cetanového čísla vyjadřuje objemové procento cetanu $C_{16}H_{34}$ ve směsi s alfa-metylnaftalenem $C_{11}H_{10}$, která má stejné vlastnosti jako zkoušené palivo. Průvodní jevy při použití paliva s nízkým cetanovým číslem jsou tvrdý chod, horší spouštění, zvýšená tvorba sazí. Jsou-li naopak použita paliva s vysokým cetanovým číslem, tak může docházet ke shoření paliva v blízkosti trysky ještě před tím, než dojde k promísení paliva se vzduchem, což má negativní vliv na kouřivost motoru a životnost vstřikovačů. Tomuto problému se u moderních motorů předchází řízením několikanásobného vstřiku. Cetanové číslo určené laboratorně pomocí empirických vztahů se označuje jako tzv. cetanový index. (42)

Obsah síry

Obsah síry v palivech je nežádoucí, protože při jejím spalování se tvoří SO_2 a při jejím kontaktu s motorovým olejem se zvyšuje jeho kyselost, což vede ke korozivní činnosti. Síra má nežádoucí vliv na účinnost a na životnost katalyzátoru a filtru pevných částic. (9)

Celkové znečištění

Hodnota celkového znečištění udává hmotnost nerozpustných cizích prvků obsažených v jednom kilogramu paliva. Zvýšené množství nerozpustných prvků může vést k poškození styčných ploch pohyblivých součástí motoru. (9)

Obsah popílku

Zvýšený obsah anorganických pevných prvků může vést k tvorbě úsad ve spalovacím prostoru a k jeho opotřebení. Tyto látky mohou také negativně působit na vysokotlaké čerpadlo a vstřikovací trysky. Obsah popelnatých látek je vyjádřen karbonizačním číslem, které se stanovuje Conradsonovou zkouškou. (9) (42)

Obsah vody

Obsah vody v palivu může způsobovat korozivní změny v palivové soustavě, ucpávání filtrů a poškození pohyblivých součástí. (9)

Jódové číslo

Jódové číslo popisuje míru nasycení řepkového oleje. S rostoucí velikostí jódového čísla se zvyšuje riziko nežádoucí tvorby usazenin na pístních kroužcích a vstřikovačích. (9)

Číslo kyselosti

Číslo kyselosti vyjadřuje podíl volných mastných kyselin, jehož hodnota odpovídá množství vodného roztoku KOH, které je potřebné pro neutralizaci volných mastných kyselin v palivu. Snižováním obsahu těchto kyselin je předcházeno korozi, opotřebením motoru a zhoršování oxidační stability paliva. (9)

Oxidační stabilita

Oxidační stabilita paliva určuje odolnost vůči chemickým změnám při dlouhodobém skladování. Tento parametr je významně ovlivňován složením mastných kyselin, a to zejména kyseliny linolové a kyseliny linoleové. Oxidační stabilita je z velké míry závislá na obsahu vody, teplotě, kontaktu oleje s kyslíkem a ušlechtilými kovy. Nízká oxidační stabilita paliva se odráží na zvyšování kyselosti, viskozity a změně barvy. (9)

Obsah fosforu

Obsah fosforu, který se v palivu vyskytuje ve formě fosfolipidů, snižuje teplotu spalování, čímž může být způsobena tvorba usazenin ve spalovacím prostoru a na výfukových ventilech. Fosfor také negativně ovlivňuje činnost oxidačních katalyzátorů. Fosfolipidy zhoršují oxidační stabilitu a mají sklon k nasycení, což může vést k ucpávání filtrů palivového systému. (9)

Obsah magnezia a hořčíku

Cílem je snižování obsahu magnezia a hořčíku, protože tyto prvky způsobují tvorbu usazenin na vstřikovačích, výfukových ventilech a ve spalovacím prostoru. (9)

Karbonizační zbytek

Karbonizační zbytek určuje sklon paliva ke karbonizaci na vstřikovačích a ve spalovacím prostoru při spalování. (9)

Příloha 2

ČSN EN 14214+A1 – Technické požadavky na metylestery mastných kyselin (FAME) pro vznětové motory

Parametr	Jednotka	Limitní hodnoty	
		min.	max.
Obsah metylesterů mastných kyselin	% (m/m)	96,5	/
Hustota při 15 °C	kg·m ⁻³	860	900
Viskozita při 40 °C	mm ² ·s ⁻¹	3,50	5,00
Bod vzplanutí	°C	101	/
Cetanové číslo	/	51	/
Koroze na mědi (3 h při 50 °C)	korozní stupeň	třída 1	
Oxidační stabilita (při 110 °C)	h	8,0	/
Číslo kyselosti	mg KOH·g ⁻¹	/	0,50
Jodové číslo	g I·100 g ⁻¹	/	120
Metylester kyseliny linolenové	% (m/m)	/	12
Metylester s více nenasycenými vazbami (≥ 4 dvojně vazby)	% (m/m)	/	1

Příloha 3

ČSN EN 590+A1 – Technické požadavky na motorové nafty

Parametr	Jednotka	Limitní hodnoty		
		min.	max.	
Cetanové číslo	/	51	/	
Cetanový index	/	46	/	
Obsah FAME	% (V/V)	/	7	
Hustota při 15 °C	kg·m ⁻³	820	845	
Polycyklické aromatické uhlovodíky	% (m/m)	/	8	
Obsah síry	mg·kg ⁻¹	/	10	
Obsah manganu	ml·l ⁻¹	/	2	
Bod vzplanutí	°C	>55	/	
Karbonizační zbytek (vztaženo na 10% destilační zbytek)	% (m/m)	/	0,3	
Obsah popela	% (m/m)	/	0,01	
Obsah vody	% (m/m)	/	0,02	
Celkový obsah nečistot	mg·kg ⁻¹	/	24	
Korozivní působení na mědi (3 h při 50 °C)	stupeň koroze	třída 1		
Oxidační stabilita (při 110 °C)	g·m ⁻³	/	25	
	h	20	/	
Mazivost, průměr oděrové plochy (wsdNP4 1,4) při 60 °C	µm	/	460	
Viskozita při 40 °C	mm ² ·s ⁻¹	2,00	4,50	
Destilační zkouška	při 250 °C předestiluje	% (V/V)	/	<65
	při 250 °C předestiluje	% (V/V)	85	/
	95 % (V/V) předestiluje při	°C	/	360

Příloha 4

ČSN 65 6508 – Technické požadavky na směsné motorové nafty obsahující FAME (MEŘO)

Parametr	Jednotka	Limitní hodnoty	
		min.	max.
Cetanové číslo	/	51	/
Cetanový index	/	46	/
Obsah FAME	% (V/V)	30	/
Hustota při 15 °C	kg·m ⁻³	820	860
Polycyklické aromatické uhlovodíky	% (m/m)	/	5,6
Obsah síry	mg·kg ⁻¹	/	10
Bod vzplanutí	°C	>55	/
Karbonizační zbytek (vztaženo na 10% destilační zbytek)	% (m/m)	/	0,3
Obsah popela	% (m/m)	/	0,01
Celkový obsah nečistot	mg·kg ⁻¹	/	24
Korozivní působení na mědi (3 h při 50 °C)	stupeň koroze	třída 1	
Oxidační stabilita	h	20	/
Mazivost, průměr oděrové plochy (wsdNP4 1,4) při 60 °C	µm	/	460
Viskozita při 40 °C	mm ² ·s ⁻¹	2,00	4,50
Číslo kyselosti	mg KOH·g ⁻¹		0,20
Bod zákalu (Cloud point)	°C	/	-8
Destilační zkouška při 250 °C předestiluje	% (V/V)	/	<65
při 250 °C předestiluje	% (V/V)	85	/
95 % (V/V) předestiluje při	°C	/	360