

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

TECHNICKÁ FAKULTA

**VLIV BIOPALIV NA EMISE SPALOVACÍCH  
MOTORŮ**

*THE EFFECT OF BIOFUELS ON EMISSIONS OF INTERNAL COMBUSTION  
ENGINES*

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Doktorská disertační práce

**Ing. PETR JINDRA**

2017

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně pod vedením školitele a uvedl jsem veškerou použitou literaturu. Tištěná a elektronická verze práce se doslovně shodují.

.....

Petr Jindra

V Praze dne 7. 8. 2017

## **Poděkování**

V tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi pomohli při vytváření této práce, kteří mi byli oporou a dávali inspiraci.

V první řadě bych rád poděkoval své přítelkyni, která mi je neustále oporou a měla nezanedbatelný podíl na vzniku této práce. Dále Ing. Martinu Kotkovi, Ph.D. a Ing. Martinu Pechoutovi, Ph.D. za odborné vedení práce a kritiku při tvorbě mé disertační práce. Velký dík dále patří mému vedoucímu a školiteli doc. Ing. Miroslavu Růžičkovi, CSc. za cenné rady. V neposlední řadě mnoha dalším kolegům, kteří se nepřímou podíleli na vzniku této práce.

## **Abstrakt**

Disertační práce se zabývá problematikou vzniku plynných a pevných emisí během spalování biopaliv ve spalovacích motorech. Disertační práce se skládá z několika částí.

Prvou částí je rešerše, která je rozdělena na tři základní části. První část je věnována popisu základních mechanismů tvorby emisí. Druhá část rešerše popisuje biopaliva, jejich vlastnosti a způsoby výroby. Poslední část rešerše analyzuje použití biopaliv ve spalovacích motorech. Tato poslední část rešerše je rozdělena na dvě podkapitoly. Prvá podkapitola analyzuje vlivy použití různých biopaliv v zážehových motorech a další popisuje použití biopaliv v motorech vznětových. Obě podkapitoly se primárně zaměřují na emise  $\text{NO}_x$  a pevné částice.

Experimentální část práce byla provedena s využitím motoru Zetor 1505. Při modifikovaném cyklu NRSC byla v motoru spalována různá biopaliva v čisté podobě nebo jako směsná biopaliva. Při experimentech byla zkoumána koncentrace pevných částic a jejich velikostní spektrum. Dále byla pomocí FTIR analyzátoru zkoumána koncentrace oxidů dusíku a spotřeba paliva.

Vliv spalování biopaliv na spotřebu paliva nebyl prokázán. V porovnání s čistou motorovou naftou vykazují některá biopaliva významný vliv na množství produkovaných částic a jejich velikostní spektrum. Například provozování motoru na směsné palivo tvořené 90 % motorové nafty a 10 % bioethanolu mělo značně nepříznivý vliv na množství produkovaných pevných částic. Na druhé straně mělo palivo, které bylo tvořeno 50 % metylesterem řepkového oleje a 50 % hydrogenovaným rostlinným olejem, pozitivní vliv na produkci pevných částic v téměř celém zkoumaném rozsahu a při všech zkoumaných provozních režimech.

Produkce emisí  $\text{NO}_x$  byla u zkoumaných paliv nižší a téměř ve všech zkoumaných případech. Jen v několika bodech byl zjištěn nárůst produkce  $\text{NO}_x$ , hlavně při spalování paliva obsahující bioethanol. Nejnižší produkce  $\text{NO}_x$  bylo dosaženo spalováním čistého HVO.

**Klíčová slova:** pevné částice, oxidy dusíků,  $\text{NO}_x$ , FTIR, EEPS, velikostní spektra pevných částic, směsná biopaliva, vznětový motor

## **Abstract**

The dissertation thesis deals with problems of gaseous and solid emissions occurring in combustion of biofuels in internal combustion engines. The dissertation thesis consists of several parts.

The first part is literature overview that is divided into three basic parts. The first part is focused on the description of the basic mechanisms of emission generation. The second part of the overview describes biofuels, their properties and ways of their production. The last part of overview analyses the usage of biofuels in internal combustion engines. This last part of overview is divided into two subchapters. The first subchapter analyses the effects of different biofuels in petrol engines and the next describes the use of biofuels in diesel engines. Both subchapters are primarily focused on NO<sub>x</sub> emissions and particulate matter.

The experimental part of thesis was carried out with a use of Zetor 1505 engine. Different biofuels were combusted in this engine in pure form or as blended biofuels under conditions of modified NRSC cycle. Particle concentration and size range were investigated during these experiments. The concentration of nitrogen oxides was further investigated by the FTIR analyzer.

The influence of biofuels' combustion on fuel consumption has not been proved. In comparison with the pure diesel, some biofuels have a significant impact on the amount of particulate matter produced and the size spectrum. For example, running of mixed fuel engine consisting of 90% diesel fuel and 10% bioethanol has had a considerable adverse effect on the amount of solid particle production. On the other hand, fuel blended up of 50% rapeseed methyl ester and 50% hydrogenated vegetable oil had a positive effect on solid participle production in almost within the whole range of investigation and within all examined operating modes.

The NO<sub>x</sub> emissions were lower in the investigated fuels and in almost of all investigated cases. Only at several points the increase in NO<sub>x</sub> production was found, especially when burning fuel contained bioethanol. The lowest NO<sub>x</sub> production was achieved by a combustion of pure HVO.

**Keywords:** particulate matter, nitrogen oxides, NO<sub>x</sub>, FTIR, EEPs, evné částice, oxidy dusíků, NO<sub>x</sub>, FTIR, EEPs, Size spectrum of particulate matter, blended biofuels, CI engine

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>9</b>
<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1 Mechanizmy tvorby emisí a pevných částic</b> .....	<b>3</b>
2.1.1 <i>Složky výfukových plynů, jejich popis a důvody vzniku</i> .....	4
2.1.2 <i>Opatření pro snížení tvorby emisí</i> .....	12
<b>2.2 Základní popis biopaliv</b> .....	<b>13</b>
2.2.1 <i>Bioethanol</i> .....	15
2.2.2 <i>Butanol</i> .....	19
2.2.3 <i>Methylestery mastných kyselin</i> .....	22
2.2.4 <i>Hydrogenovaný rostlinný olej</i> .....	25
<b>2.3 Použití biopaliv ve spalovacích motorech</b> .....	<b>26</b>
2.3.1 <i>Použití biopaliv v zážehových motorech</i> .....	27
2.3.2 <i>Použití biopaliv ve vznětových motorech</i> .....	29
<b>3. CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>42</b>
<b>4. MATERIÁLY A METODY</b> .....	<b>44</b>
<b>4.1 Testovaný motor</b> .....	<b>45</b>
<b>4.2 Měřicí zařízení</b> .....	<b>46</b>
4.2.1 <i>Vířivý dynamometr VD250</i> .....	46
4.2.2 <i>Analyzátor plyných emisí</i> .....	47
4.2.3 <i>Analyzátor pevných částic</i> .....	48
4.2.4 <i>Spotřeba paliva</i> .....	49
<b>4.3 Testovaná paliva</b> .....	<b>49</b>
<b>4.4 Měřicí metody</b> .....	<b>52</b>
4.4.1 <i>Statistické vyhodnocení dat</i> .....	52
4.4.2 <i>Zkušební cyklus</i> .....	52
<b>5. VÝSLEDKY</b> .....	<b>55</b>
<b>5.1 Spotřeba paliva</b> .....	<b>55</b>
5.1.1 <i>Dílčí závěry použití biopaliv na spotřebě paliva</i> .....	59
<b>5.2 Produkce PM</b> .....	<b>60</b>
5.2.1 <i>Analýza PM v měřícím bodě 1</i> .....	61

5.2.2	<i>Analýza PM v měřicím bodě 2</i>	63
5.2.3	<i>Analýza PM v měřicím bodě 3</i>	64
5.2.4	<i>Analýza PM v měřicím bodě 4</i>	66
5.2.5	<i>Analýza PM v měřicím bodě 5</i>	67
5.2.6	<i>Dílčí závěry analýzy PM při režimech s otáčkami motoru 2 200 ot. ·min<sup>-1</sup></i>	68
5.2.7	<i>Analýza PM v měřicím bodě 6</i>	69
5.2.8	<i>Analýza PM v měřicím bodě 7</i>	70
5.2.9	<i>Analýza PM v měřicím bodě 8</i>	72
5.2.10	<i>Analýza PM v měřicím bodě 9</i>	74
5.2.11	<i>Analýza PM v měřicím bodě 10</i>	75
5.2.12	<i>Dílčí závěry analýzy PM při režimech s otáčkami motoru 1 500 ot. ·min<sup>-1</sup></i>	77
5.2.13	<i>Analýza PM v měřicím bodě 11</i>	78
5.2.14	<i>Analýza PM v měřicím bodě 12</i>	79
5.2.15	<i>Dílčí závěry analýzy PM</i>	80
<b>5.3</b>	<b>Produkce NO<sub>x</sub></b>	<b>82</b>
5.3.1	<i>Teplota výfukových plynů</i>	85
<b>6.</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>87</b>
<b>7.</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>91</b>
<b>8.</b>	<b>SEZNAM LITERATURY</b>	<b>94</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Produkce oxidu uhličitého v letech 1750 – 2011 [6].....	5
Obrázek 2 - Schéma pronikání pevných částic do lidského organismu (zdroj autora) .....	9
Obrázek 3 - Aglomerát PM (zdroj autora).....	10
Obrázek 4 - Typické rozložení produkce PM, dle počtu a hmotnosti (přeloženo) [18] .....	11
Obrázek 5 - Schéma výroby bioethanolu z cukrové řepy (upraveno [38]) .....	17
Obrázek 6 - Schéma výroby bioethanolu z obilovin (upraveno [38]) .....	18
Obrázek 7 - Schéma výroby bioethanolu z lignocelulosové biomasy (upraveno [38]).....	19
Obrázek 8 - Schéma výroby biobutanolu (upraveno [49]) .....	22
Obrázek 9 - Proces transesterifikace (převzato [53]) .....	24
Obrázek 10 – Typická struktura triglyceridu [57] .....	25
Obrázek 11- Produkce $\text{NO}_x$ v závislosti na stechiometrickém poměru pro různá paliva [63].....	27
Obrázek 12 - Produkce THC, $\text{NO}_x$ , CO v závislosti na předstihu [64].....	28
Obrázek 13 - Vliv butanolu na nespálené uhlovodíky a $\text{NO}_x$ (upraveno, přeloženo [65])	29
Obrázek 14 - Vliv paliva E10 na kouřivost motoru [76].....	30
Obrázek 15 - Produkce emisí $\text{NO}_x$ a kouřivost v závislosti na zatížení motoru a použitém palivu (upraveno, přeloženo [81]) .....	31
Obrázek 16 - Závislost kouřivosti a produkce NO na koncentraci butanolu.....	32
Obrázek 17 - Závislost produkce CO, $\text{NO}_x$ , HC a kouřivost na okamžiku zapálení směsi (upraveno, přeloženo [84]).....	32
Obrázek 18 - Vliv butanolu na kouřivost (převzato, upraveno) [85] .....	33
Obrázek 19 - Vliv kouřivosti v závislosti na středním efektivním tlaku a použitém palivu [57].....	35
Obrázek 20 - Vliv produkce emisí $\text{NO}_x$ na středním efektivním tlaku a použitém palivu [57].....	36
Obrázek 21 - nárůst produkce $\text{NO}_x$ v závislosti na zatížení motoru (převzato, upraveno) [8] .....	36
Obrázek 22 - Závislost produkce emisí na otáčkách motoru a použitém palivu [101] .....	37
Obrázek 23 - Relativní změna produkce emisí v porovnání s motorovou naftou [106] ....	39
Obrázek 24 - Motor Z 1505 .....	45
Obrázek 25 - FTIR analyzátor Midac I1801-E.....	47
Obrázek 26 - Částicový analyzátor TSI EESP 3090 .....	48



Obrázek 27 - Celkový přehled měřicího stanoviště.....	54
Obrázek 28 - Celková účinnost motoru pro jednotlivá paliva.....	55
Obrázek 29 - Hodinový spotřeba paliva, v závislosti na použitém biopalivu .....	57
Obrázek 30 - Energetický příkon dodaný palivem, v závislosti na použitém biopalivu .....	58
Obrázek 31 - Měřicí bod 1 - 2 200 ot./min – 100% zatížení .....	62
Obrázek 32 - Měřicí bod 2 - 2 200 ot./min - 75% zatížení.....	63
Obrázek 33 - Měřicí bod 3 - 2 200 ot./min - 50% zatížení.....	64
Obrázek 34 - Měřicí bod 4 - 2 200 ot./min - 25% zatížení.....	66
Obrázek 35 - Měřicí bod 5 - 2 200 ot./min - 10% zatížení.....	67
Obrázek 36 - Měřicí bod 6 - 1 500 ot./min - 100% zatížení.....	69
Obrázek 37 - Měřicí bod 7 - 1 500 ot./min - 75% zatížení.....	71
Obrázek 38 - Měřicí bod 8 - 1 500 ot./min - 50% zatížení.....	72
Obrázek 39 - Měřicí bod 9 - 1 500 ot./min - 25% zatížení.....	74
Obrázek 40 - Měřicí bod 10 - 1 500 ot./min - 10% zatížení.....	76
Obrázek 42 - Měřicí bod 11 - volnoběžné otáčky - 0% zatížení .....	78
Obrázek 43 - Měřicí bod 12 - 1 200 ot./min - 0% zatížení.....	79
Obrázek 43 - Vliv biopaliv na produkci NO <sub>x</sub> .....	82
Obrázek 44 - Vliv biopaliv na teplotu výfukových plynů .....	85

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Složení výfukových plynů [1] .....	4
Tabulka 2 - Základní parametry paliv [33][34][35][36].....	15
Tabulka 3 - Izomery butanolu a jejich základní využití [45][46] .....	20
Tabulka 4 - Srovnání parametrů benzínu, ethanolu a n-butanolu [45].....	20
Tabulka 5 - Srovnání základních parametrů motorové nafty, řepkového oleje a MEŘO ..	23
Tabulka 6 - Základní parametry HVO, FAME a motorové nafty [54] [53].....	26
Tabulka 7 - Technické parametry motoru Z 1505 .....	45
Tabulka 8 - Technické parametry dynamometru V250 .....	46
Tabulka 9 - Technické parametry tenzometru S-22 .....	47
Tabulka 10 - Vybrané technické parametry FTIR analyzátoru Midac I1801-E.....	47
Tabulka 11 - Vybrané parametry analyzátoru TSI EEPS 3090.....	48
Tabulka 12 - Technická specifikace váhy .....	49

Tabulka 13 - Použitá paliva a jejich složení .....	50
Tabulka 14 - Základní palivářské vlastnosti zkoumaných paliv .....	51
Tabulka 15 - Nastavení měřících bodů pro ISO 8178 - C1 .....	53
Tabulka 16 – Navržený zkušební cyklus .....	54
Tabulka 17 - Výsledky statistické analýzy pro celkovou účinnost motoru v závislosti na použitém biopalivu .....	56
Tabulka 18 - Výsledky statistického analýzy hodinové spotřeby paliva v jednotlivých bodech měření v závislosti na použitém biopalivu.....	57
Tabulka 19 - Výsledky statistického analýzy vlivu energetického příkonu paliva v jednotlivých bodech měření v závislosti na použitém biopalivu.....	58
Tabulka 20 - Hodnocení hypotézy 2.....	61
Tabulka 21 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřící bod 1 .....	62
Tabulka 22 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřící bod 2.....	63
Tabulka 23 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřící bod 3.....	65
Tabulka 24 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřící bod 4.....	66
Tabulka 25 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřící bod 5.....	67
Tabulka 26 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřící bod 6.....	69
Tabulka 27 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřící bod 7.....	71
Tabulka 28 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřící bod 8.....	72
Tabulka 29 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřící bod 9.....	74
Tabulka 30 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřící bod 10.....	76
Tabulka 31 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřící bod 11 .....	78
Tabulka 32 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřící bod 12.....	79
Tabulka 33 - Výsledky statistické analýzy vlivu biopaliv na emise NO <sub>x</sub> .....	83

# 1. ÚVOD

Od počátku existence člověka je lidstvo provázeno potřebou pohánět nejrůznější stroje a zařízení. Vynález spalovacího motoru, který postupem času nahradil méně efektivní parní stroje, umožnil zvýšit dynamiku rozvoje civilizace do současné úrovně. Díky neustálému vylepšování a rozšiřování působnosti spalovacích motorů v posledním půlstoletí si nelze fungování civilizace bez tohoto zdroje mechanické práce ani představit a to jak z hlediska zemědělství, dopravy a řady dalších odvětví lidské činnosti.

Primárním zdrojem paliva pro spalovací motory byly již v jejich počátcích fosilní zdroje, nejčastěji se jedná o paliva na bázi ropy. V motorech dochází ke spalování paliva ve spalovacím prostoru. Emise vzniklé při spalování paliva a mazacího oleje obsahují látky, které jsou škodlivé pro životní prostředí a lidské zdraví.

Během samotných počátků automobilismu neměli konstruktéři zdaleka takové možnosti jako dnes. Přesto i nyní v důsledku prudkého rozvoje využívání spalovacích motorů je nutné řešit řadu negativních dopadů jejich provozu na životní prostředí a zdraví lidí. Se vzrůstajícím počtem motorů, které spotřebovávají palivo a produkují emise, se začaly objevovat i jejich nedostatky. Lidé začali zkoumat další možné dopady provozování spalovacích motorů.

Jako první věc si uvědomili, že fosilních paliv není neomezené množství a je tedy nutno palivem šetřit, nebo najít vhodnou alternativu. V počátcích vývoje spalovacích motorů byl podíl využití fosilních a obnovitelných paliv velmi podobný. Ovšem se zdokonalující se technologií těžby a zpracování ropy, stejně jako objev velkého množství snadno dostupných ložisek mělo za následek, že obnovitelná paliva nedokázala držet krok s fosilními. S přibývajícím časem a zmenšováním potenciálních zásob fosilních paliv se společnost pomalu začíná připravovat na přechod na jiná paliva nebo i jiný způsob pohonů.

Použití fosilních paliv má prokazatelně nepříznivý vliv na životní prostředí. Spalování neobnovitelných zdrojů, tj. fosilních paliv, se neustále do atmosféry uvolňuje další a další oxid uhličitý, který je považován za skleníkový plyn. Ten se také výrazně podílí na globálním oteplování. Jednou z možností, jak snížit produkci oxidu uhličitého je použití alternativních biopaliv ve spalovacích motorech. Použití těchto paliv v principu vytváří uzavřený cyklus produkce a spotřeby CO<sub>2</sub>. Při pěstování surovin pro výrobu biopaliv dochází během fotosyntézy k odstraňování plynného CO<sub>2</sub> z atmosféry. Následné spálení biopaliva do

atmosféry pak přidá jen stejné množství CO<sub>2</sub> jaké bylo potřeba k růstu fotosyntézující rostliny. Při produkci biopaliva se využívají přírodní zdroje, nejčastěji zemědělské plodiny.

Podobně jako v případě klasických fosilních paliv, lze i biopaliva míchat a různě upravovat, tak aby měla vhodné vlastnosti pro použití ve spalovacích motorech. Smícháním různých paliv a biopaliv vzniknou směsná biopaliva, která do jisté míry přebírají vlastnosti složek, ze kterých jsou vyrobeny. Tak lze poměrně dobře navrhnout biopalivo, které bude mít lepší vlastnosti z hlediska produkce emisí NO<sub>x</sub> a produkce pevných částic.

## 2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Přehled současného stavu řešené problematiky je rozdělen do třech základních kapitol. První kapitola se věnuje popisu emisí a tomu, jak vznikají. Následuje kapitola, která se věnuje základnímu popisu biopaliv, jejich výrobě a vlastnostem s ohledem na jejich možné použití ve spalovacích motorech. Poslední kapitola se věnuje dopadům spalování biopaliv ve spalovacích motorech. V této kapitole je kladen důraz na popis vazby mezi biopalivem a emisemi.

### 2.1 Mechanizmy tvorby emisí a pevných částic

Během spalování směsi paliva a vzduchu ve válci dochází v ideálním případě ke vzniku oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) a vody ( $\text{H}_2\text{O}$ ). V případě nedokonalého spálení směsi se ve výfukových plynech dále objevuje oxid uhelnatý ( $\text{CO}$ ) a vodík ( $\text{H}_2$ ). V případě, že se jedná o motor zážehový, neměly by výfukové plyny obsahovat žádný kyslík ( $\text{O}_2$ ). Pokud se ve výfukových plynech vyskytuje kyslík, může to být způsobeno jeho přebytkem v čerstvé směsi (nejčastěji přeplňované motory) nebo nedošlo k jeho využití. U motorů vznětových se kyslík ve výfukových plynech vyskytuje vždy, neboť vznětové motory pracují s přebytkem kyslíku. [1]

Hlavní složkou atmosféry je dusík ( $\text{N}_2$ ). Ten tvoří 78,08 % plynné složky atmosféry. [2] Proto je i nejvýznamnější složkou ve výfukových plynech. U motorů zážehových tvoří 71 %, u motorů vznětových tvoří přibližně 67 %. Při nevhodné teplotě spalin dochází ke vzniku oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ), hlavně oxidu dusnatého ( $\text{NO}$ ), ale také oxidu dusičitého ( $\text{NO}_2$ ) a oxidu dusného ( $\text{N}_2\text{O}$ ). [1]

Pokud nedojde ke správné oxidaci paliva, může to vést ke vzniku nespálených uhlovodíků ( $\text{HC}$ ). [1]

Přítomnost síry v palivu má pak za následek vznik oxidů síry. [1]

V případě nedokonalého přístupu vzduchu k palivu dochází při vysoké teplotě k dekompozici molekul uhlovodíku za vzniku elementárního uhlíku, který má charakter sazí a tvoří podstatnou část částic ve výfukových plynech označovaných zkratkou PM (z anglického výrazu „Particulate Matter“). [1]

Přibližné složení výfukových plynů zážehových a vznětových motorů je zobrazeno v tabulce Tabulka 1.

*Tabulka 1 - Složení výfukových plynů [1]*

Složka	Zážehový motor (≈% obj.)	Vznětový motor (≈% obj.)
Dusík (N <sub>2</sub> )	71	67
Oxid uhličitý (CO <sub>2</sub> )	14	12
Voda (H <sub>2</sub> O)	13	11
Kyslík (O <sub>2</sub> )	0	10
Ostatní složky (HC, NO <sub>x</sub> , CO, SO <sub>2</sub> , PM)	2	0.3

### **2.1.1 Složky výfukových plynů, jejich popis a důvody vzniku**

Výfukové plyny jsou směsicí několik plynů a částic. Mezi hlavní složky se řadí oxid uhelnatý a uhličitý, oxidy dusíku, oxidy síry, nespálené uhlovodíky a pevné částice.

#### **Oxid uhelnatý**

Oxid uhelnatý je pro lidský organizmus škodlivý. Jeho škodlivost spočívá ve schopnosti vytvářet s krevním barvivem pevný karboxyhemoglobin, který zamezuje přenosu kyslíku z plic do krve. Mírná otrava se projevuje nespecifickými příznaky jako je bolest hlavy, svalů, závratě. Závažná otrava způsobuje neurologické poškození, zmatenost a ztrátu vědomí a následně i smrt. U nekuřáků se uvádí jako abnormální hladina karboxyhemoglobinu v krvi vyšší než 2 % a u kuřáků 9 %. [3]

U zážehových motorů dochází k vytváření oxidu uhelnatého při nedokonalém spálení směsi paliva a vzduchu. Jako hlavní příčina se uvádí nedostatek kyslíku ve směsi. Tento nedostatek může vzniknout kdykoliv, kdy je motor provozován v bohaté směsi, kdy je součinitel přebytku vzduchu  $\lambda < 1$ . Dále může být tento nedostatek pouze místní nebo časový. Jako další projev nedokonalého spalování je pak výskyt kyslíku ve výfukových plynech. [1]

U vznětových motorů, které pracují vždy s přebytkem kyslíku, se oxiduje všechen CO na CO<sub>2</sub>. Ve výfukových plynech pak můžeme změřit přibližně desetinu CO oproti motoru zážehovému. [5]

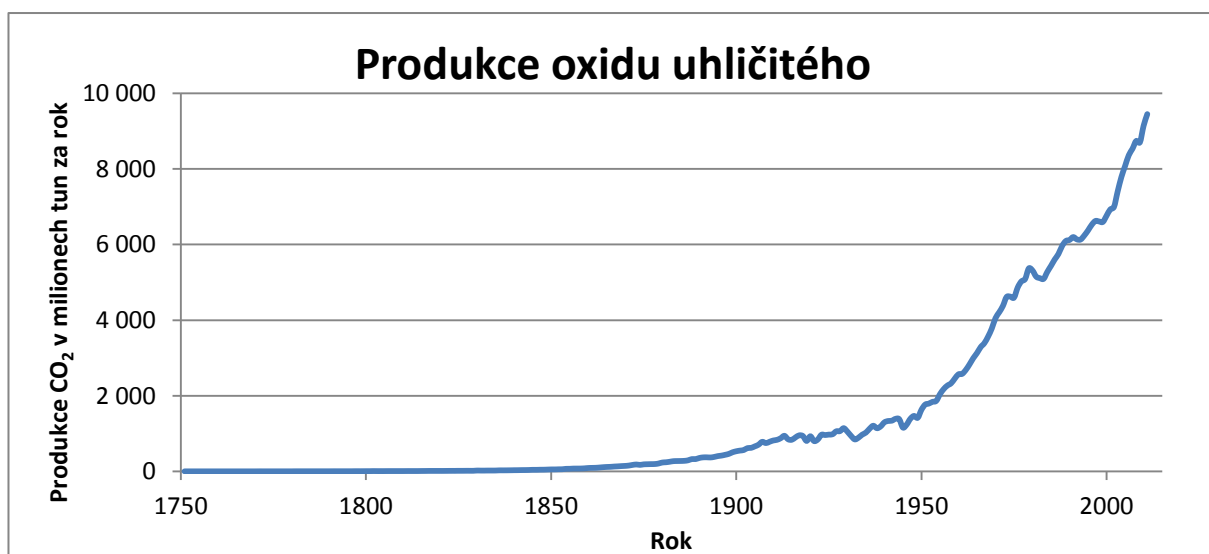
## Oxid uhličitý

Oxid uhličitý je produktem dokonalé oxidace. Výskyt této složky ve výfukových plynech je důkazem správné funkce motoru a spalovacího procesu.

Plyn sám o sobě není nebezpečný. Je bezbarvý, bez zápachu, stabilní. Využívá se například jako ochranný plyn při svařování.

V koncentraci do 3 % je pro člověka neškodný, koncentrace 5 % způsobuje závrať a problémy s dýcháním, koncentrace 8 – 10 % má za následek bezvědomí a později i smrt.[6] Nebezpečnost nespočívá v plynu samotném, ale spíš v tom, že je schopen vytěsnit kyslík, který je potřebný k dýchání.

Lidská činnost má zásadní vliv na produkci CO<sub>2</sub>. Podle měření shromažďovaných organizací CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center) je patrný nárůst produkce CO<sub>2</sub>, jehož průběh je patrný na obrázku 1, který zobrazuje produkci CO<sub>2</sub> v milionech tun za jeden rok. Data jsou sbírána od roku 1750.



Obrázek 1 - Produkce oxidu uhličitého v letech 1750 – 2011 [7]

Česká republika se podílí na produkci 29 857 tisíci tunami CO<sub>2</sub> za rok (data za rok 2015). V produkci se řadí na 37. místo světově. [7]

Oxid uhličitý je považován za skleníkový plyn, který se podílí na globálním oteplování tím, že vytváří radiační clonu mezi povrchem Země a blízkým vesmírem. Tím je omezeno sdílení tepla. [1]

## Oxidy dusíku

Za oxidy dusíku  $\text{NO}_x$  jsou označovány oxid dusnatý (NO) vznikající při vysokých teplotách ve spalovacím prostoru a oxid dusičitý ( $\text{NO}_2$ ) vznikající oxidací NO. Do  $\text{NO}_x$  se nezahrnuje  $\text{N}_2\text{O}$ , který je velmi stabilní, není zdravý škodlivý, ale je velmi potentní skelníkový plyn. [4]

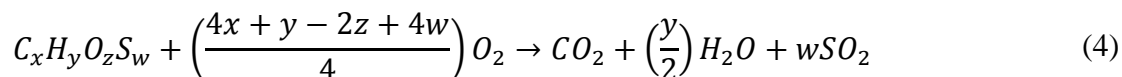
I přes svou jedovatost je jejich funkce v organismu nezastupitelná, jako signální molekula v těle. Má významný vliv na funkci kardiovaskulárního a neurovaskulárního systému. Dále má vliv na relaxaci cév, což se pozitivně projevuje ve schopnosti prokrvovat orgány. [8]

Při vdechování oxidů dusíku reaguje se sliznicemi za vzniku kyseliny dusičné ( $\text{HNO}_3$ ). To má za následek poleptání sliznice. Ta pak reaguje snížením množství vdechovaného vzduchu, což vede k dušení a kašli. [1]

Tvorbu plynu popisuje Zeldvičova řetězová reakce, která probíhá dle následujících rovnic (1 – 3). [9]



Oxidy dusíku vznikají z důvodu nedodržení termodynamické rovnováhy při spalování paliva v motoru. To je způsobeno velkou rychlostí reakce. Chemická reakce pro úplné spálení paliva je uvedena ve vzorci (4). [10]



V případě, že dojde ke zvýšení teploty výfukových plynů přibližně na teplotu 1900 – 2000 °C, oxiduje u zážehových motorů vzdušný kyslík s dusíkem za vzniku oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ). Nejvyšších teplot ve spalovacím motoru se dosahuje při směsi  $\lambda = 1,05 - 1,1$ , tedy mírně chudé směsi. Důležitým předpokladem je tedy dostatek kyslíku. Při těchto podmínkách jsou koncentrace  $\text{NO}_x$  nejvyšší. [1]



## **Nespálené uhlovodíky**

Nespálené uhlovodíky jsou sloučeniny uhlovodíků, které do procesu spalování vstupují jako palivo nebo vznikají jako součást procesu spalování. Výskyt nespálených uhlovodíků můžeme pozorovat jako bílý kouř z výfuku. [11] [1]

Toxicita nespálených uhlovodíků pro člověka je různá, podle účinků konkrétního uhlovodíku. Jako nejméně nebezpečné lze považovat původní uhlovodíky v palivu. Uhlovodíky vzniklé při nedokončeném procesu hoření jsou považovány za toxické a karcinogenní. [11] [12]

Mechanismy vzniku nespálených uhlovodíků jsou předčasně ukončené reakce hoření. Podobně jako při vzniku CO je nejčastějším důsledkem příliš nízká teplota stěn válců, která nedovolí dokonalé spálení.

Mezi nejnebezpečnější nespálené uhlovodíky se řadí tzv. polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH). PAH jsou tvořeny vždy alespoň dvěma benzenovými jádry. V čisté podobě se jedná o krystalickou formu bílé nebo nažloutlé barvy. PAHy jsou velice dobře rozpustné v tucích a olejích. Polycyklické aromatické uhlovodíky mají velmi dobrou schopnost se vázat (sorbovat) na pevné částice nebo prach, čímž se značně zvyšuje jejich schopnost distribuce prostorem a lidským tělem. [13]

## **Oxidy síry**

Oxidy síry jsou reprezentovány hlavním zástupcem a tím je oxid siřičitý  $\text{SO}_2$ . Jedná se o bezbarvý a jedovatý plyn.

Oxidy síry můžeme najít hlavně u vznětových motorů, kde se síra nachází jako nežádoucí příměs paliva. Jejich podíl je v celkovém měřítku zanedbatelný, výrazně menší než 0,1 %. S pokračujícím zdokonalováním čištěním nafty se podíl síry ve výfukových plynech neustále zmenšuje. [1]

## **Pevné částice**

Pevné částice jsou mikroskopické částice, pevné nebo kapalné částice, které jsou rozptýlené v zemské atmosféře. [14]

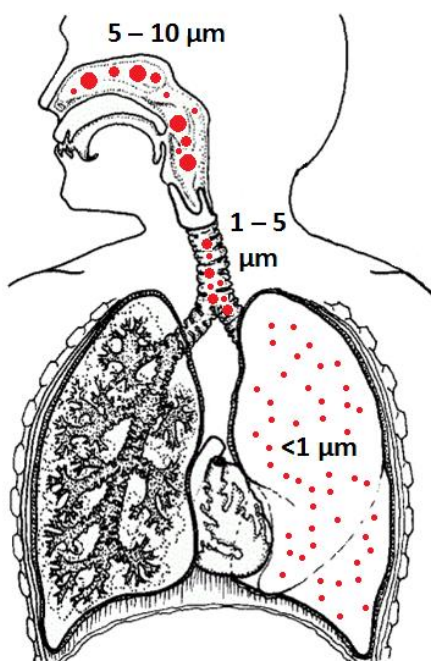
Dle zákonů USA lze pevné částice považovat jakékoliv látky ve výfukových plynech za normálních podmínek, které jsou pevné (popel, saze) nebo kapalné.[15]

Pevné částice ve výfukových plynech jsou tvořeny hlavně elementárním uhlíkem (tzv. černé saze), organickým uhlíkem a menší míře otěrovými částicemi z motoru a jejich oxidy a nespalitelnou částí (tzn. popelem) paliva a mazacího oleje. Ve výfukových plynech je můžeme pozorovat jako tmavý kouř z výfuku. Jedná se tedy o jednu ze složek výfukových plynů, která je přímo viditelná. Kondenzací následně vznikají tzv. sekundární aerosoly zejména sloučeniny síry a dusíku. [16]

Nebezpečnost elementárního uhlíku samotného je velmi malá. Na elementární uhlík je dále vázána celá řada rakovinotvorných látek např. benzo[a]pyren. Pokud je organismus vystaven pevným částicím po krátkou dobu, může dojít k podráždění očí a dýchacích cest. To může vyvolat nucené zvracení nebo dušnost. Při dlouhodobějším vystavení může vést k zánětu plic. Jako referenční hodnota množství PM ve vzduchu, která nezpůsobuje rakovinotvorný efekt, se uvádí  $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^3$ . [17][16] Naproti tomu evropská směrnice 2008/50 ve své preambuli uvádí, že pro koncentrace částic v ovzduší neexistuje žádná bezpečná hladina.

Pevné částice mají velice různorodou velikost, která se může pohybovat od  $10 \mu\text{m}$  až po velice malé částice kolem  $1 \text{ nm}$ . Díky této různorodosti vzniká problém s jejich distribucí po organismu. Velké částice kolem cca  $5 \mu\text{m}$  jsou odstraněny v nosních dutinách. Částice do  $1 \mu\text{m}$  jsou odstraněny v horních dýchacích cestách. Částice, jejichž velikost je menší než  $0,1 \mu\text{m}$ , mohou dosáhnout povrchu plic. Pokud je částice ještě menší, přibližně jednotek až desítek nanometrů, může projít skrz plicní stěnu do lymfatického systému nebo krevního řečiště. Zde je pak volně distribuována do celého těla. [18][16]

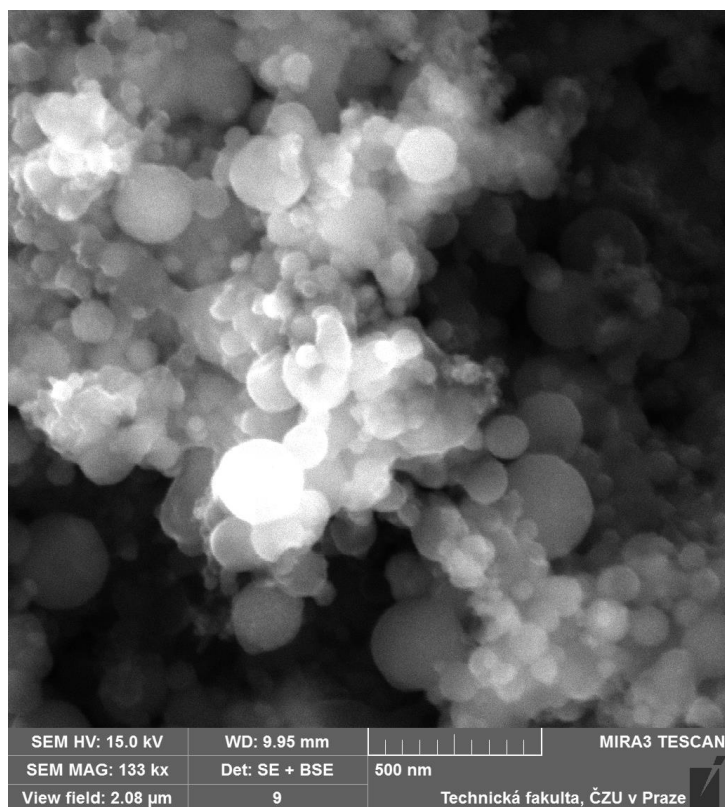
Na obrázku 2 je zjednodušené schéma distribuce pevných částic v dýchací soustavě lidského organismu.



*Obrázek 2 - Schéma pronikání pevných částic do lidského organismu (zdroj autora)*

Problém takto malých částic je jejich ohromná povrchová plocha, která podporuje schopnost sorpce látek usazených pevných částicích, například polycyklických aromatických uhlovodíků. Kombinací těchto vlastností vzniká velice nebezpečná složka výfukových plynů s rakovinotvorným potenciálem, která se v současné době dostává do popředí výzkumu.

Na obrázku 3 je snímek aglomerátu PM z elektronového mikroskopu s využitím technologie SEM (Scanning Electron Microscope, řádkovací elektronový mikroskop). Na obrázku jsou patrné pevné částice tvaru kuliček, které se spojily do složitějšího tvaru. Je obecně známo, že koule má velký poměr mezi objemem a plochou. Takový aglomerát je tvořen velkým množstvím PM. Na snímku je tedy poměr mezi objemem částice a jejím povrchem.



*Obrázek 3 - Aglomerát PM (zdroj autora)*

Pevné částice jsou dle Kittelsova [19] produkovány ve třech základních módech:

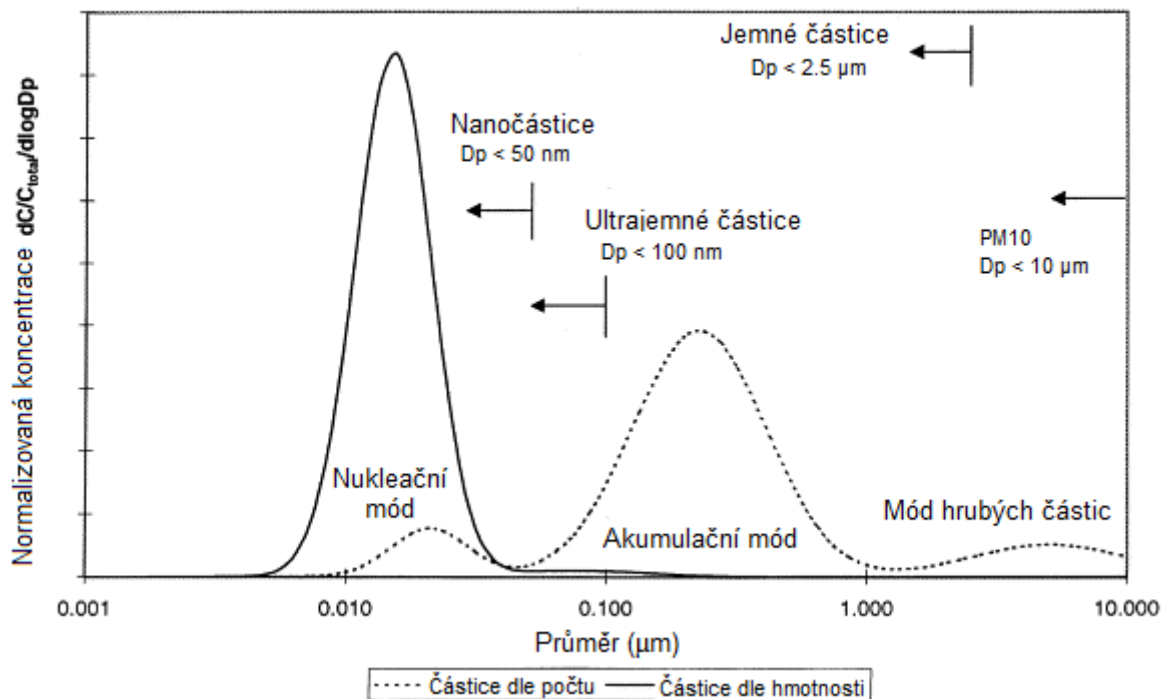
- Mód hrubých částic
- Akumulační mód
- Nukleační mód

Mód hrubých částic jsou částice s typickým rozměrem kolem 2  $\mu\text{m}$ . Tyto částice vznikají nejčastěji mechanickou cestou.

Částice akumulárního módu jsou částice vytvořené koagulací menších částic. Typická velikost částic akumulárního módu je v rozmezí 100 – 500 nm.

Nukleační mód částic obsahuje nejmenší částice. Tyto nanočástice vznikají kondenzací atmosférických vlivů nebo emisí z horkých procesů. Nejčastěji se jedná o částice s rozměrem menším než 30 nm. [20]

Typické rozložení velikosti výfukových plynů motoru je zobrazeno na obrázku 4, zde je zobrazena typická produkce pevných částic. Uvedené křivky zobrazují typickou produkci při zjišťování počtu PM a hmotnosti PM. [19]



Obrázek 4 - Typické rozložení produkce PM, dle počtu a hmotnosti (přeloženo) [19]

### 2.1.2 Opatření pro snížení tvorby emisí

Motory jsou vybavovány různými zařízeními, mechanismy a systémy, jejichž cílem je snížení produkce škodlivin. Obecně lze tyto opatření rozdělit na tři základní skupiny pro oba základní typy motorů:

- Opatření před motorem – tvorba směsi a ovlivnění směšovacího poměru;
- Opatření u motoru – ovlivnění průběhu spalování;
- Opatření za motorem – dodatečná úprava spalin.

U zážehových motorů se opatření před motorem dají řešit jen vhodnou volbou směšovacího poměru. Nastává zde komplikace v podobě nemožnosti snížit všechny škodliviny současně. Pokud se podaří snížit produkci CO a HC, je směšovací poměr nastaven tak, že motor produkuje nejvíce NO<sub>x</sub> a opačně. [1]

Za základní opatření u motoru je považována volba vhodného kompresního poměru. Kompresní poměr (jeho vliv na teplotu) a tvar spalovacího prostoru mají vliv na produkci NO<sub>x</sub> a HC. Dalším parametrem je nastavení předstihu a energie použitá pro zážeh. Opět má doba předstihu vliv na produkci NO<sub>x</sub> a HC v souvislosti s teplotou. Další možností jak snížit produkci škodlivin je použití recirkulace výfukových plynů EGR (Exhaust Gas Recirculation). Zde dochází z omezení produkce NO<sub>x</sub> tím, že ve válci zůstává část spálených plynů, která se chová inertně (bez vlivu na spalování), ovšem snižuje teplotu v průběhu spalovacího procesu a dostupnost kyslíku. Tím dojde k poklesu teploty a snížení produkce NO<sub>x</sub>. [1]

V současné době jsou všechna vozidla se zážehovými motory vybavena třícestným katalyzátorem. Díky oxidaci je v katalyzátoru odstraněn CO a HC. Redukcí jsou pak ze spalin odstraněny NO<sub>x</sub>. V dnešní době moderních přímovstříkových zážehových motorů s vrstvenou tvorbou směsi je nutné provádět dodatečné odstranění NO<sub>x</sub> pomocí sběrných katalyzátorů. [1]

U motorů vznětových se problematika opatření před motorem týká hlavně vhodného návrhu plnění válce, kdy je potřeba dosáhnout správného promíchání směsi nafty a vzduchu.

Opatření u motoru zde úzce souvisí s opatřeními před motorem. Návrh spalovacího prostoru, společně s návrhem vhodné doby vstříku, hraje zásadní roli při vzniku škodlivých

emisí. U motorů vznětových se také používá recirkulace spalin za pomoci EGR ventilu, který po určitou dobu cyklu spojí výfukové a sací potrubí.

Vznětové motory používají jako opatření za motorem tři základní úpravy. Oxidační katalyzátor snižuje emise CO a HC. Filtr pevných částic snižuje produkci pevných částic. Dále je využitím selektivní katalytické redukce snižováno množství NO<sub>x</sub>. [1]

## **2.2 Základní popis biopaliv**

Biopalivem se rozumí plynná nebo kapalná hmota vyráběná z biomasy, určená pro energetické využití. Biopaliva jsou považována za obnovitelný zdroj energie. Základní dělení biopaliv se určuje podle jejich vstupních zdrojů na jednotlivé generace. V současné době se používají biopaliva první a druhé generace.

První generace biopaliv používá jako vstupní suroviny plodiny používané v potravinářství. Jedná se tedy o přímou konkurenci potravin. Biopaliva první generace mají jen velmi malý vliv na celkovou bilanci atmosférického CO<sub>2</sub>. Podle této studie [21] biopaliva první generace snižují celkovou bilanci CO<sub>2</sub> o méně než 10 %. Ovšem mnoho jiných autorů uvádí i výrazně odlišnější výsledky. [102][24] Druhá generace biopaliv již nepoužívá potravinářských plodin. Již méně často se v současnosti využívají biopaliva třetí generace, která za svůj základ berou řasy a mikroorganismy.

Nedílnou součástí hodnocení vlivu biopaliv na životní prostředí je zohlednění životního cyklu produktu LCA (z angl. Life Cycle Assessment). LCA je víceúrovňový přístup k hodnocení, který pokrývá celý životní cyklus výrobku.[22][23]

Mezi hlavní nevýhody většiny LCA studií patří jejich úzké zaměření pouze na skleníkové plyny nebo energetickou bilanci.[25]

### **První generace biopaliv**

Mezi tato biopaliva lze zařadit taková paliva, k jejichž přípravě byly použity plodiny obsahující jednoduchý cukr nebo látku, kterou lze přeměnit na jednoduchý cukr (škrob). Dále plodiny, ze kterých lze relativně jednoduše získat olej. [26][27]

Biopaliva první generace jsou popsána směrnicí 2003/30/ES. Mezi tradiční biopaliva první generace, které se nejčastěji používají ve spalovacích motorech, se dle této směrnice řadí:

- Bioetanol (cukrová třtina, cukrová řepa, kukuřice, obilí)
- MEŘO – metylester řepkového oleje
- Rostlinný olej (řepkový olej)

### **Druhá generace biopaliv**

Vstupní surovinou biopaliv druhé generace jsou nepotravinářské plodiny. Typicky tak může být dřevo nebo dřevěný odpad, sláma a rychle rostoucí traviny, papír nebo biologický odpad. Nevýhoda biopaliv druhé generace vyplývá z velké technologické náročností. To klade zvýšené finanční nároky, které by měly být kompenzovány snadnou dostupností vstupní suroviny. Technologická náročnost zpracování biopaliv druhé generace spočívá nutnosti získat jednoduše zkvasitelné cukry. Toho je dosahováno složitými procesy mletí a následné hydrolýze celulózy, při které se získají jednoduše zkvasitelné cukry. Takto lze vyrobit syntetický plyn, který za pomoci několika katalytických procesů lze zkapalnit. [27][28][29]

Mezi tradiční biopaliva druhé generace se řadí:

- Bioetanol (z lignocelulózové biomasy)
- Syntetická nafta získaná Fischer-Tropschovou syntézou
- biometanol získaný katalytickou konverzí syntézního plynu

### **Třetí generace biopaliv**

Třetí generace biopaliv využívá jako vstupní surovinu řasy. Ty se dají pěstovat v bioreaktorech nebo v otevřených nádržích např. rybnících. Takto získané řasy se dají snadno použít jako surovina pro výrobu paliva velmi podobného motorové naftě. Zásadní nevýhoda tohoto typu biopaliva spočívá ve výrazně menší stabilitě. [27][30][31]

Velmi vhodné se jeví využití rostliny *Eichhornia crassipes*, známé jako Tokozelka vodní hyacint. Jedná se o rychle rostoucí rostlinu, která je obecně považována za plevel. Řadí se mezi potenciální zdroje surovin pro výrobu bioethanolu cestou zpracování lignocelulosové biomasy. [32][33]



### 2.2.1 Bioethanol

Bioethanolem je nazýváno palivo vyrobené z biomasy pomocí technologie alkoholového kvašení. Výsledná molekula má funkční vzorec  $C_2H_5OH$ , jedná se tedy o druhý nejjednodušší alkohol. Je tedy naprosto shodná s ethanolem a předložka bio tak označuje pouze vstupní surovinu.

Ethanol je čirá tekutina ostrého pachu. Jeho použití v zážehových motorech je možné bez větších komplikací. Ethanol má oktanové číslo přibližně 107 a jeho výhřevnost je přibližně  $26,8 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Oproti tomu má benzín výhřevnost přibližně  $42,7 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Proto je nutné pro zachování výkonu dodat do spalovacího motoru více paliva. [34]

V současné době je v ČR nejrozšířenější formou využití bioethanolu jako paliva jeho použití v palivu E85. Technické požadavky a metody zkoušení paliva E85 popisuje norma ČSN P CEN/TS 15293. Jedná se o vysokoprocenní směs benzínu a bioethanolu v nominálních poměrech 15 % benzínu Natural N95 a 85 % bioethanolu. Zmíněná norma připouští koncentraci bioethanolu 70 – 85 %, nižší koncentrace se používají zejména v zimních obdobích pro zajištění startovatelnosti motoru. Základní parametry těchto dvou základních složek a samotné E85 jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2 - Základní parametry paliv [35][36][37][38]

Parametr	Jednotky	Bioethanol	Natural 95	E85
Bod varu	°C	78,3	30 – 215	30 – 210
Hustota (při 15 °C)	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	794	720 – 750	781
Kinem. viskozita (při 20 °C)	$\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	1,52	0,4 – 0,8	
Výhřevnost	$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	28,9	44,4	29
OČVM*		106 – 130	95	107,4
OČMM**		89 – 103	85	89,7
Tlak par dle Reida RVP (při 37,8 °C)	kPa	16	45 – 90	35 – 90
Obsah kyslíku	hm. %	34,7	2,7	25 – 30

\*OČVM – oktanové číslo výzkumnou metodou

\*\* OČMM – oktanové číslo motorovou metodou

Analýzou životního cyklu bioethanolu byl zjištěn pokles emisí  $\text{CO}_2$  o 32 % při použití pšenice jako vstupní suroviny. V případě, že byla jako vstupní surovina použita pšeničná sláma, došlo k poklesu emisí  $\text{CO}_2$  o 87 %.[39]

## Výroba bioethanolu

Výroba bioethanolu je založena na fermentačním procesu, známém také jako kvašení. Většinou proces probíhá bez přístupu vzduchu, anaerobně. K provzdušnění dochází na počátku kvasného procesu, což vede k větší aktivitě buněk a jejich většímu nárůstu.

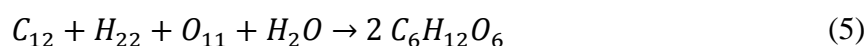
Podmínkou přímého kvašení je, aby byly kvašeny monosacharidy. Složitější sacharidy musí být před vlastním kvašením hydrolyzovány. To je zajištěno působením mikroorganismů nebo přidáním kyselin, které způsobují hydrolýzu kvasného média. [40]

V současné době lze výrobu bioethanolu rozdělit na tři základní skupiny podle toho co je použito za vstupní surovinu:

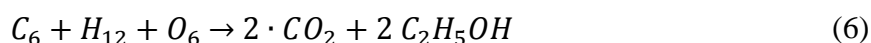
- Biomasa obsahující jednoduché cukry, např. cukrová řepa nebo třtina
- Biomasa obsahující škroby, nejčastěji obiloviny
- Lignocelulózová biomasa, např. vodní hyacint, sláma nebo štěpky [40][33]

### *Výroba bioethanolu z cukrové řepy*

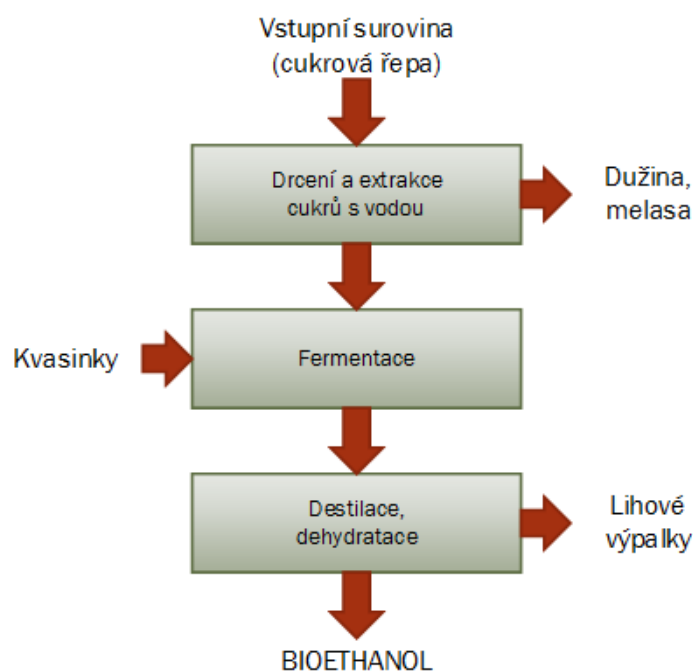
Cukrová řepa obsahuje sacharózu. Dle rovnice 5 se sacharóza přemění na jednoduché cukry, které lze snadno separovat a následně fermentovat. Schematicky je tento proces zobrazen na obrázku 5. Před samotným zahájením procesu fermentace je cukrová třtina rozdrcena a propláchnuta vodou. Jako odpad je oddělena dužina a melasa. [40]



Takto vzniklé jednoduché cukry jsou dále zkvašovány kvasinkami za vzniku  $CO_2$  a bioethanolu. Proces fermentace se řídí dle rovnice 6.



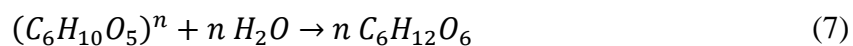
V samotné výrobě pak následuje poslední krok, kterým je destilace fermentovaného média. Během destilace se oddělí bioethanol od destilačního zbytku. Následující úprava rafinací odstraňuje vedlejší produkty fermentace. Výsledkem těchto procesů je pak bioethanol, který obsahuje přibližně 4,5 % vody. Množství vody obsažené v bioethanolu je kvalitativním znakem palivového bioethanolu. Pro další snižování podílu vody je třeba dalších metod, nejčastěji se používá metoda molekulárního síta. [40]

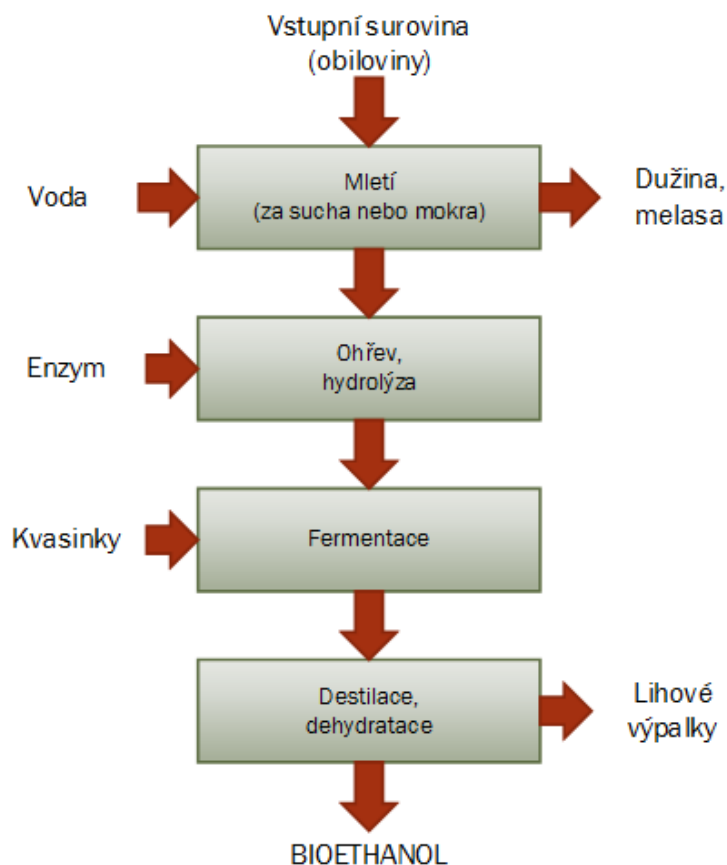


Obrázek 5 - Schéma výroby bioethanolu z cukrové řepy (upraveno [40])

### ***Výroba bioethanolu z obilovin***

Obiloviny se před vlastním procesem zpracování škrobu drtí. Následně se na vzniklou hmotu nechají působit enzymy. Následuje zápar, kdy dochází k bobtnání a zmazovatění škrobu. Takto upravený škrob se nechává působením enzymů nebo kyselou hydrolyzou přeměnit na glukosu. Ta je následně dle rovnice 7 kvašena ve fermentoru. Výsledný produkt je podobný tomu co vzniká fermentací cukrové řepy a následují pak i shodné postupy úprav bioethanolu. Blokové schéma výroby bioethanolu z obilovin je znázorněno na obrázku 6. [40][41]



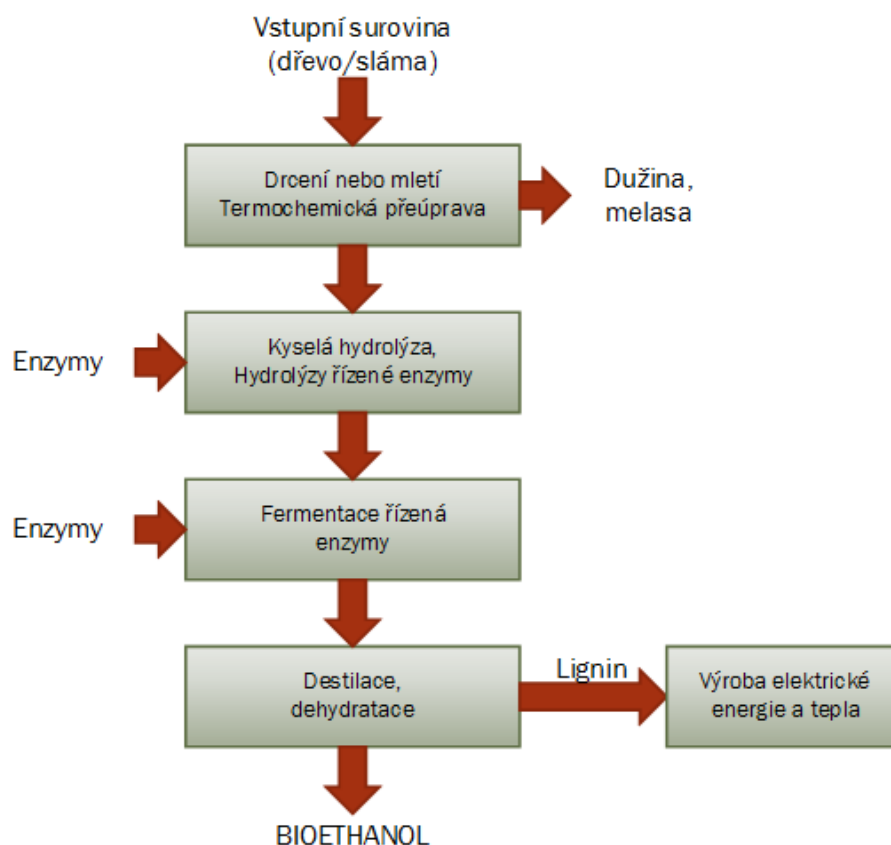


Obrázek 6 - Schéma výroby bioethanolu z obilovin (upraveno [40])

### ***Výroba bioethanolu z lignocelulosové biomasy***

Technologicky nejsložitější výroba bioethanolu má za vstupní surovinu lignocelulosovou biomasu. Jedná se především o zbytky ze zemědělské produkce, např. sláma nebo již vylisovaná cukrová třtina. Dále může být jako vstupní surovina použita biomasa z rychle rostoucích energetických dřevin, což je v našich podmínkách např. vrba a s tím související zpracování zbytků a odpadů z dřevařského průmyslu, tedy zpracování kůry nebo pilin. Díky existenci tolika možných zdrojů levné vstupní suroviny je technologie výroby bioethanolu z lignocelulosové biomasy v popředí zájmů výzkumu. Výtěžnost cukru z těchto zdrojů může dosahovat až 80 %. Z jedné tuny pšeničné slámy bylo experimentálně získáno až 330 litrů bezvodného bioethanolu. [40][42][43][44][45]

Proces samotné výroby bioethanolu z lignocelulosové biomasy je velmi podobný procesu výroby bioethanolu z obilovin. Zásadní rozdíl spočívá v tom, že při zpracování lignocelulosy je prováděna kyselá hydrolýza. Blokově je schéma znázorněno na obrázku 7. [40][42][45]



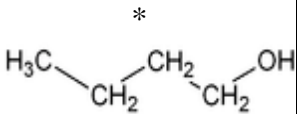
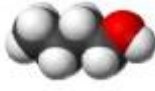
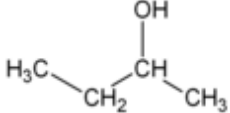

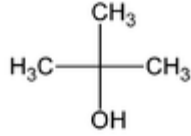

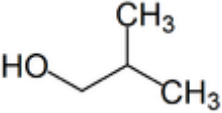

Obrázek 7 - Schéma výroby bioethanolu z lignocelulosové biomasy (upraveno [40])

### 2.2.2 Butanol

Butanol je čirá tekutina ostrého pachu. Jedná se o alkohol, jehož funkční vzorec je  $C_4H_9OH$ . Molekula tohoto alkoholu může tvořit 4 různé izomery, které se liší svou strukturou, chemickými, ale i fyzikálními vlastnostmi. Oproti bioethanolu je butanol stabilnější a méně agresivní vůči součástem motoru. [46]

Izomery butanolu, jejich vzorce a nejčastější použití je v tabulce 3. Základní porovnání butanolu s benzínem a ethanolem je uvedeno v tabulce 4. [47][48]

Tabulka 3 - Izomery butanolu a jejich základní využití [47][48]

Název molekuly	Schéma molekuly	Obrázek molekuly	Použití
<b>1 – butanol</b> (n-butanol)			Rozpouštědla, změkčovadla, kosmetika, přísada do benzínu nebo chemický meziprodukt
<b>2 – butanol</b> (sec-butanol)			Chemický meziprodukt, parfémů a umělá aromata
<b>2-methyl-propan-2-ol</b> (t-butanol)			Průmyslové čističe, přísada do benzínu,
<b>2-methyl-propan-1-ol</b> (iso-butanol)			Rozpouštědla a aditiva pro nátěrové hmoty, přísada do benzínu, přísada do inkoustů

Tabulka 4 - Srovnání parametrů benzínu, ethanolu a n-butanolu [47]

Parametr	Jednotky	Benzín	Ethanol	n-Butanol
<b>Funkční vzorec</b>			$C_2H_5OH$	$C_4H_9OH$
<b>Cetanové číslo</b>		0 – 10	8	25
<b>Oktanové číslo</b>		80 – 99	108	96
<b>Obsah kyslíku</b>	% hm.	~	34,8	21,6
<b>Hustota</b>	$kg \cdot m^{-3}$	720 - 780	790	808
<b>Výhřevnost</b>	$MJ \cdot kg^{-1}$	42,7	26,8	33,1
<b>Stechiometrický poměr</b>		14,7	9,02	11,21
<b>Kinematická viskozita</b>	$mm^2 \cdot s^{-1}$	0,4 – 0,8	1,08	2,63

## Výroba butanolu

Existují dvě základní cesty výroby butanolu. První a nejběžnější je cesta petrochemická z ropy. Druhou, a pro účely této práce vhodnější cestou, je z obnovitelných zdrojů. Nejpoužívanější metodou pro výrobu butanolu z obnovitelných zdrojů je ABE fermentace. Hlavní produkty této metody jsou Aceton, Butanol, Ethanol (proto název ABE). Hlavní roli v procesu ABE fermentace hraje působení mikroorganismu *Clostridium acetobutylicum*. Ten

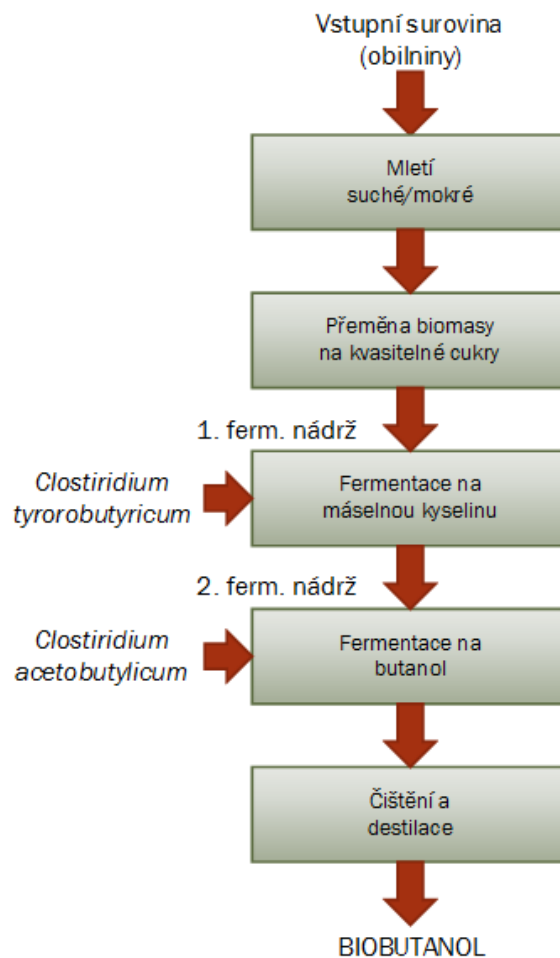
vylučuje řadu enzymů, které pomáhají rozložit polysacharidy do jednodušších a lépe zkvasitelných monosacharidů. [47][48][49]

Při využití mikroorganismů *Clostridium acetobutylicum* se během ABE fermentace získá 15 % - 25 % butanolu, dále přibližně 28 % acetonu a 14 % ethanolu. Při využití výše zmíněných mikroorganismů není možné dosáhnout vyššího podílu butanolu. Butanol v médiu působí jako inhibitor na kvasinky a celý proces kvašení zastavuje. [50]

Objev kvasinek *Clostridium tyrobutyricum* přinesl zásadní průlom do výroby biobutanolu. Tyto kvasinky, spolu s nově vyšlechtěným druhem kvasinek *Clostridium acetobutylicum*, mohou dosáhnout při optimální produkci  $4,64 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  butanolu a výtěžnost z glukózy dosahuje přibližně 44 %. [50]

Výroba butanolu se tak rozdělila na hlavní fáze. Po přípravných krocích (mletí a příprava na kvasitelné cukry) se médium dopraví do první fermentační nádrže, kde dojde k přeměně glukózy na vodík ( $\text{H}_2$ ) a máselnou kyselinu ( $\text{C}_3\text{H}_7\text{COOH}$ ). Jako vedlejší produkt vzniká  $\text{CO}_2$ .

Následuje přečerpání z první fermentační nádrže do druhé. Ve druhé fermentační nádrži dochází vlivem působení kvasinek *Clostridium tyrobutyricum* k přeměně máselné kyseliny na butanol. Stručné schéma výroby biobutanolu je na obrázku 8. [50]



Obrázek 8 - Schéma výroby biobutanolu (upraveno [51])

Celý proces zpracování butanolu se řídí rovnicemi 8 a 9. [50]



### 2.2.3 Methylestery mastných kyselin

Methylestery mastných kyselin (FAME – Fatty Acid Methyl Ester) je biopalivo, které má potenciál nahradit běžnou motorovou naftu. V ČR je nejrozšířenější formou FAME methylester řepkového oleje (MEŘO), které se vyrábí z řepkového oleje. Často je nazýván bionaftou a na čerpacích stanicích je lze nalézt pod označením B100. MEŘO může být



použito ve vznětových motorech i bez jejich úprav nebo může být smícháno s běžnou motorovou naftou.

Přestože je výsledná molekula MEŘO odlišná od molekuly motorové nafty, jsou palivářské vlastnosti MEŘO velmi blízké vlastnostem motorové nafty. Jejich stručný popis lze najít v tabulce 5, hodnoty pro motorovou naftu předepisuje norma ČSN EN 590, pro MEŘO dle normy ČSN EN 14 214.

*Tabulka 5 - Srovnání základních parametrů motorové nafty, řepkového oleje a MEŘO*

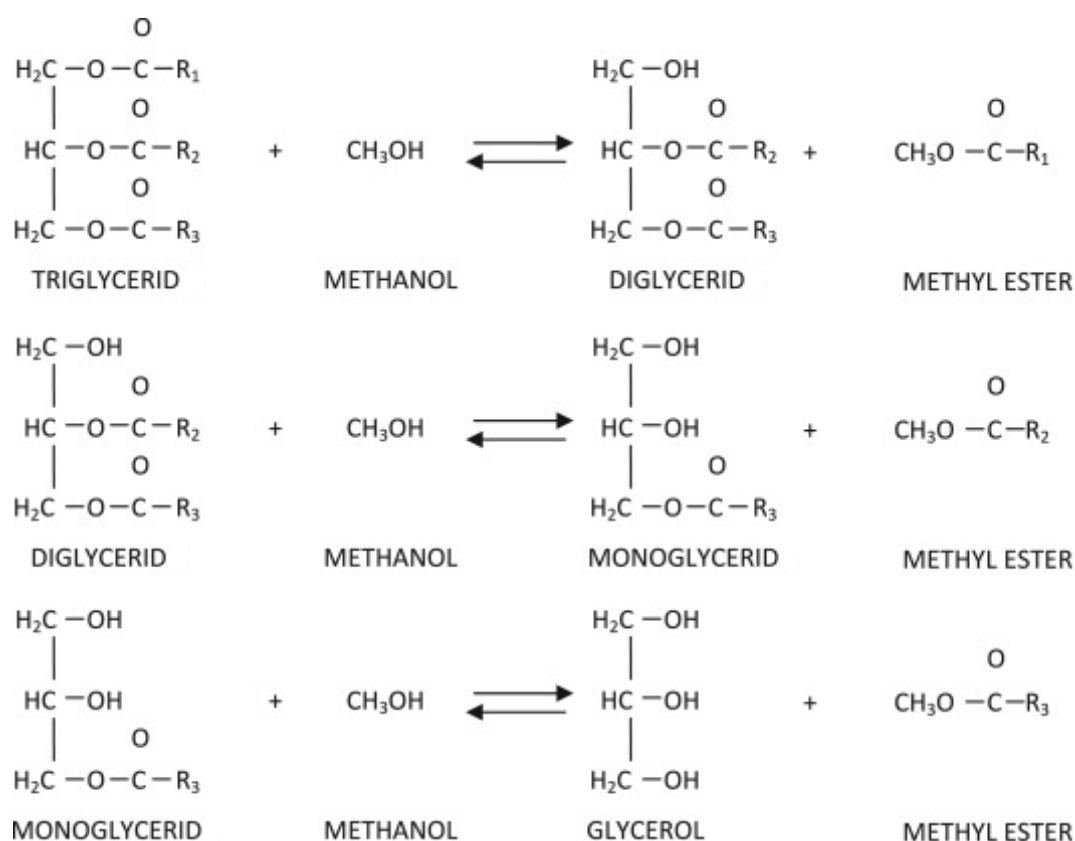
<b>Parametr</b>	<b>Jednotky</b>	<b>Motorová nafta</b>	<b>Řepkový olej</b>	<b>MEŘO</b>
<b>Hustota (při 15 °C)</b>	kg·m <sup>-3</sup>	835	915	860 – 900
<b>Kinem. viskozita</b>	mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	23,5	35	3,5 – 5
<b>Bod tuhnutí</b>	°C	-8		-8
<b>Bod vzplanutí</b>	°C	> 55	246	> 120
<b>Cetanové číslo</b>		53	38	> 51
<b>Výhřevnost</b>	MJ·kg <sup>-1</sup>	43	36	37,1 – 40,7
<b>Karbonizační zbytek</b>	% hm.	0,1 – 0,3	–	max. 0,3

## Výroba MEŘO (FAME)

Základním postupem, na kterém je založena výroba FAME, je transesterifikace triglyceridů, která je realizována za přítomnosti vhodného katalyzátoru. [52] [53] [54]

Prvním krokem zpracování biomasy je získání oleje. Ten můžeme získat lisováním, extrakcí nebo kombinací těchto postupů. Takto získaný olej lze spalovat ve vznětových motorech i bez úprav, ale rostlinný olej má mnoho nevhodných vlastností (např. vysoká viskozita, nevhodné cetanové číslo 35 – 50) a provoz na toto palivo není bezproblémový.

Pro vylepšení palivářských vlastností, musí proběhnout proces transesterifikace. Zde se jako první rozpustí hydroxid draselný (nebo sodný) jako katalyzátor v methanolu. Takto připravený katalyzátor se smíchá s rostlinným olejem v uzavřeném reaktoru. Zde dochází k procesu transesterifikace triglyceridů, která je znázorněna na obrázku 9. [53] [54] [55]



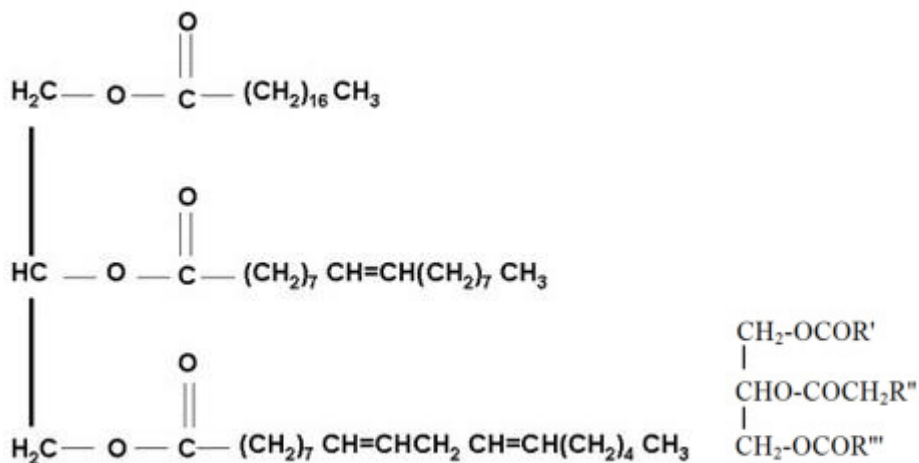
Obrázek 9 - Proces transesterifikace (převzato [55])

## 2.2.4 Hydrogenovaný rostlinný olej

Hydrogenovaný rostlinný olej (HVO, z angl. Hydrotreated Vegetable Oil) je parafinovaná kapalina biologického původu. Její funkční vzorec je  $C_nH_{2n+2}$ . HVO může být vyrobeno z rostlinného nebo živočišného oleje či tuku. Základem zpracování je hydrogenace a jejím cílem je získání biopaliva, jímž lze přímo nahradit fosilní motorovou naftu. [56]

Jako HVO se velice často označují produkty, které jsou částečně nebo zcela vyráběny z exploatovaných kuchyňských olejů nebo odpadních tuků. Takové produkty lépe vystihuje označení HEFA (z angl. Hydrotreated Esters and Fatty Acids).[57]

Během hydrogenace je z molekuly triglyceridu (nebo také triacylglycerolu – TGA), který je hlavní složkou rostlinných olejů, odstraněn kyslík. Ten je následně odveden v podobě vody. Jako vedlejší produkt reakce je produkován propan ( $C_3H_8$ ), který je možné dále využívat pro výrobu energie. Konfigurační vzorec triglyceridu je zobrazen na obrázku 10. [58][56]



Obrázek 10 – Typická struktura triglyceridu [59]

Srovnání základních parametrů hydrogenovaného rostlinného oleje, methylesteru mastných kyselin a běžné motorové nafty (ČSN EN 590) je zobrazeno v tabulce 6.

Tabulka 6 - Základní parametry HVO, FAME a motorové nafty [56] [55]

Parametr	Jednotky	HVO	FAME	Motorová nafta
Hustota (při 15 °C)	kg·m <sup>-3</sup>	775 – 785	885	835
Kinem. viskozita	mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	2,9 – 3,5	4,5	3,5
Cetanové číslo		84 – 99	51	53
Výhřevnost	MJ·kg <sup>-1</sup>	44	38	43
Obsah kyslíku	% hm.	0	11	0
Obsah síry	mg·kg <sup>-1</sup>	~ 0	< 10	< 10
Bod tuhnutí	°C	-5 – -30	-5	-8

### 2.3 Použití biopaliv ve spalovacích motorech

V současné době se výzkum biopaliv dostává do popředí nejenom díky výzkumu v automobilovém průmyslu, ale čím dál častěji i do médií a tím i veřejného podvědomí. Proto se čím dál častěji můžeme setkávat s diskuzemi a dotazy veřejnosti na téma, jaký vliv budou mít biopaliva na další vývoj v automobilovém průmyslu. Kompletní přehled výroby a přijatých národních politik a strategických plánů v hlavních zemích podporujících využití biopaliv provedl SU a kol.[60]

Další popis využití biopaliv ve spalovacích motorech bude z důvodů přehlednosti rozdělen na použití ve vznětových a zážehových motorech. Stručně se práce pokusí nastínit, jakým způsobem se v současné době nahlíží na možné cesty, jak získat trvale udržitelné palivo pro spalovací motory.

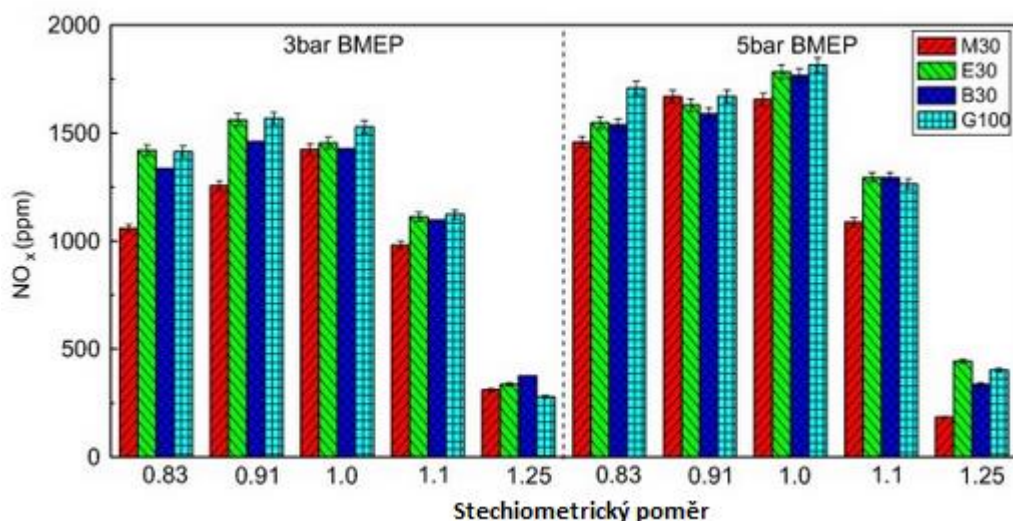
Použití biopaliv ve spalovacích motorech je velice atraktivní a ve vědeckých kruzích intenzivně zkoumaná problematika. V současné době lze ve vědeckých databázích nalézt mnoho tisíc publikovaných článků a studií. V rámci této disertační práce je provedena rešerše jen menšího množství vědeckých publikací. Zpracování většího množství by vydalo na několik samostatných prací a je nad rámec této disertační práce.

### 2.3.1 Použití biopaliv v zážehových motorech

Spalováním biopaliv v zážehových motorech může mít pozitivní vliv na jejich emise. Mezi dostupná biopaliva, která se již běžně používají v zážehových motorech, se řadí bioethanol.

Bioethanol lze použít jako aditivum pro benzín. Zážehový motor lze za určitých podmínek provozovat i na čistý bioethanol a to bez nutnosti zásadních konstrukčních úprav. [61] Díky vyššímu oktanovému číslu je ovšem možné zvýšit kompresní poměr motoru a tím dosáhnout vyšší účinnosti.[62][63] Bioethanol vykazuje vysoké výparné teplo, čímž snižuje špičkovou teplotu ve spalovacím prostoru a zvyšuje výkon motoru.[62][64]

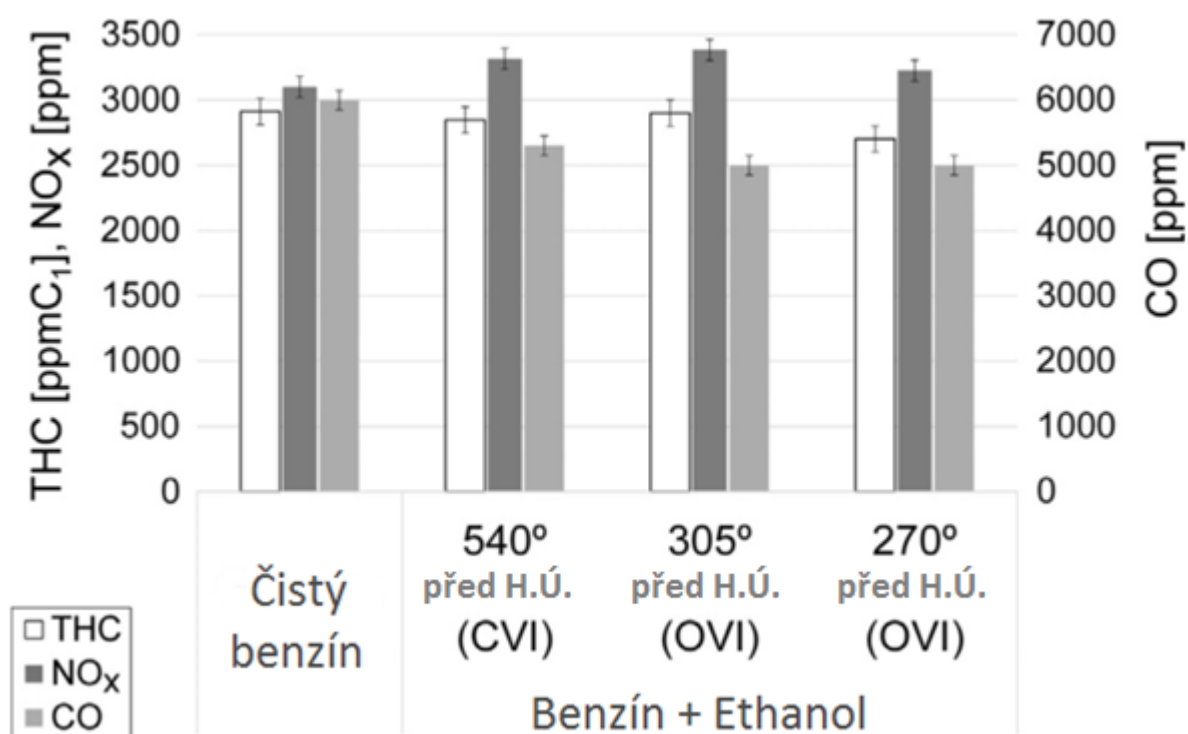
Problematikou se zabýval Li a Gong ve své práci [65]. V jeho experimentu porovnal vliv aditiva na provozní parametry testovaného motoru. Jako aditivum byly použity ethanol (E30), butanol (B30) a methanol (M30), vždy v koncentraci 30 %. Výsledky ukazují, že aditivace ethanolem a butanolem má pozitivní přínos na nespálené uhlovodíky. Zásadní vliv na produkci  $\text{NO}_x$  má stechiometrický poměr směsi. Při správném nastavení dojde k mírnému poklesu produkce  $\text{NO}_x$ . Na obrázku 11 je znázorněna závislost produkce  $\text{NO}_x$  na použitém palivu, stechiometrickém poměru a střednímu efektivnímu tlaku.



Obrázek 11- Produkce  $\text{NO}_x$  v závislosti na stechiometrickém poměru pro různá paliva [65]

M30 – 30% podíl methanolu; E30 – 30% podíl ethanolu; B30 – 30% podíl butanolu; G100 – čistý benzín

Zážehový motor je velice citlivý na nastavení. Emise zážehového motoru lze tedy velice dobře optimalizovat vhodným nastavením parametrů motoru. Vhodný okamžik vstřiku paliva a vhodným čas zažehnutí směsi má klíčový vliv na chování motoru. Ve svém výzkumu Kim a kol. [66] použil dva systémy tvorby směsi. Bioethanol byl vstřikován nepřímou a benzín přímo do válce. Část výsledků použití tohoto dvoupalivového systému je naznačeno na obrázku 12. Zde je znázorněna produkce THC (z angl. Total HydroCarbon),  $\text{NO}_x$  a CO v závislosti na časování vstřiku paliva.



Obrázek 12 - Produkce THC,  $\text{NO}_x$ , CO v závislosti na časování vstřiku paliva [66]

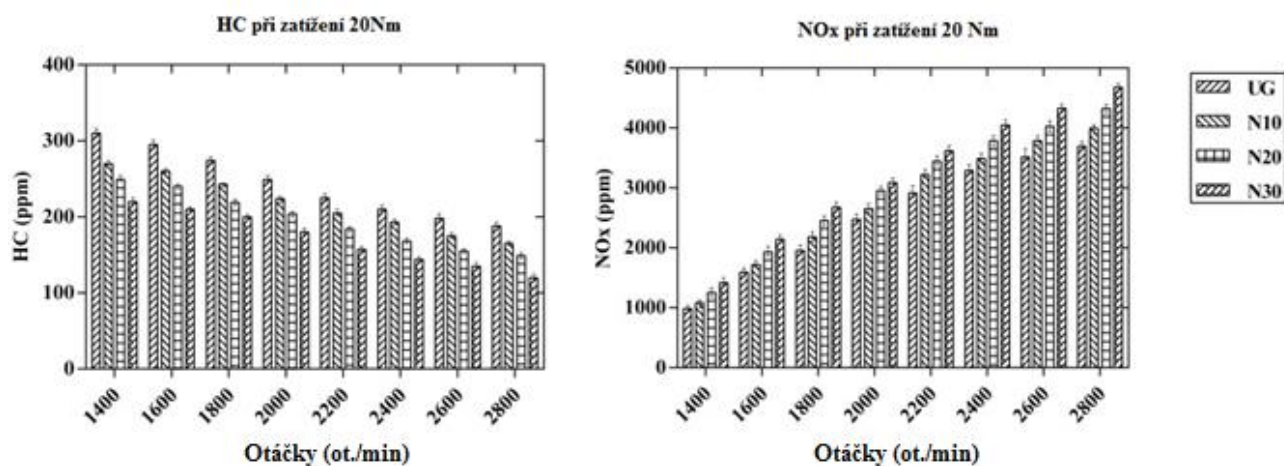
CVI – vstřik na uzavřený ventil; OVI – vstřik na otevřený ventil

Vhodnou alternativou ke klasickému benzínu Natural 95 se jeví použití biobutanolu. Butanol může být v zážehovém motoru použit jako aditivum i v čisté podobě.

Použitím nízkoprocentní směsi benzínu a n-butanolu se zabýval Dhamodaran a kol. [67]. Při experimentu byly testovány směsi 10 %, 20 % a 30 % n-butanolu. Byl zkoumán vliv podílu butanolu na produkci plynných emisí, konkrétně CO, HC a  $\text{NO}_x$ . Testovací 4 válcový motor měl objem 993 cm<sup>3</sup>. Motor byl vybaven nepřímým vstřikem paliva (Multi Port Fuel Injection MPFI). Výsledky ukazují, že butanol ve směsi měl vliv na všechny zkoumané

veličiny. Produkce CO klesala s vyšším podílem butanolu, podobně nespálené uhlovodíky. Opačný trend, tedy nárůst produkce, byl změřen u  $\text{NO}_x$ .

Závislost produkce nespálených uhlovodíků a oxidů dusíku na otáčkách a použitém palivu je znázorněna na obrázku 13. [67]



Obrázek 13 - Vliv butanolu na nespálené uhlovodíky a  $\text{NO}_x$  (upraveno, přeloženo [67])

UG – čistý benzín; N10 – 10% podíl n-butanolu; N20 – 20% podíl n-butanolu; N30 – 30% podíl n-butanolu

### 2.3.2 Použití biopaliv ve vznětových motorech

Biopaliva lze ve vznětových motorech použít v čisté formě nebo jako aditivum motorové nafty. Dále je možné motorovou naftu aditivovat dvěma základními druhy biopaliv a to založenými na bázi alkoholu nebo na bázi olejů.

#### Směsné palivo motorové nafty a alkoholu

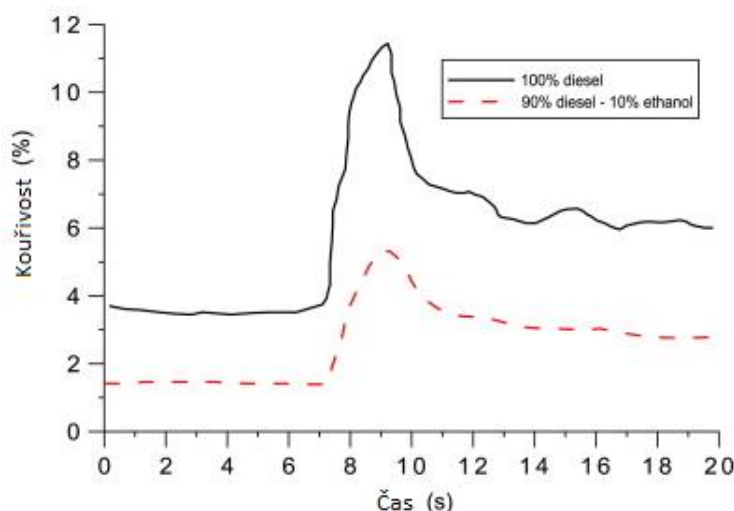
Vznětové motory jsou široce používány v průmyslu, zemědělství, pro mobilní i stacionární aplikace [68], hlavně z důvodů jejich vysoké spolehlivosti, trvanlivosti a vysoké účinnosti při spalování paliva [69], [70],[71], [72].

Důvody použití biopaliv založených na alkoholu v podobě příměsi do motorové nafty můžeme shrnout do několika základních bodů. Hlavním cílem bývá většinou dosažení lepší účinnosti spalování a tím nižší spotřeby paliva. Další z cílů bývá snížení produkce PM a  $\text{NO}_x$ . [73] [74] [75]

Jako aditivum motorové nafty se běžně pro výzkum používá n-butanol a bioethanol. [76][77]

Komplexní srovnání směsi bioethanolu a motorové nafty provedl [78]. Studoval diskrétní přechodné jevy paliva E10 (10% směs bioethanolu a 90 % motorové nafty) bez stabilizačního činidla. Typickým výsledkem přidání nízkého procenta bioethanolu do motorové nafty je snížení kouřivosti motoru. Obrázek 14 zachycuje průběh kouřivosti v čase, při konstantních otáčkách ( $1\,700\text{ ot.}\cdot\text{min}^{-1}$ ). Mezi 7. a 12. sekundou měření je patrný nárůst kouřivosti motoru, který je způsobený změnou zatížení z 26 na 90 Nm. Bioethanol v motorové naftě tak prokazatelně snižuje kouřivost motoru a to jak maximální hodnotu, tak hodnoty při ustálených provozních režimech. Podobných výsledků dosahují i jiní autoři. [79][80][81][82]

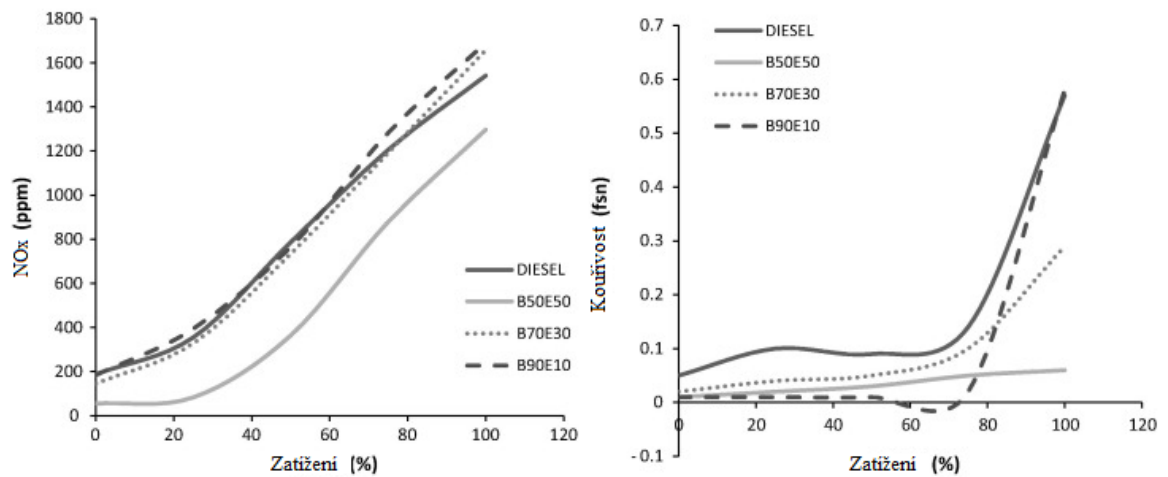
Nevýhodou použití bioethanolu je vysoký tlak par, nízká mazivost a nízké cetanové číslo. Vysoký tlak par bioethanolu snižuje bod vzplanutí paliva.



Obrázek 14 - Vliv paliva E10 na kouřivost motoru [78]

Prbakaran a Viswanathan [83] zkoumal provozní parametry vznětového motoru při provozu na běžnou motorovou naftu, bionaftu a ethanol. Pro experiment byl použit jednoválcový motor o zdvihovém objemu  $662\text{ cm}^3$  a výkonu 4,41 kW. Motor byl provozován na směs bionafty (vyrobené transesterifikace ze semen bavlny) a ethanolu v poměru 10%, 30 % a 50 %. Zkoumané parametry byly emise  $\text{NO}_x$  a kouřivost. Výsledky prokazují vliv ethanolu, který je velmi závislý na poměru ethanolu v bionaftě. Přínos je v tomto případě diskutabilní. Některé směsi mají pozitivní a jiné velmi negativní vliv na emise v porovnání s běžnou motorovou naftou. Vybrané výsledky jsou uvedeny na obrázku 15.

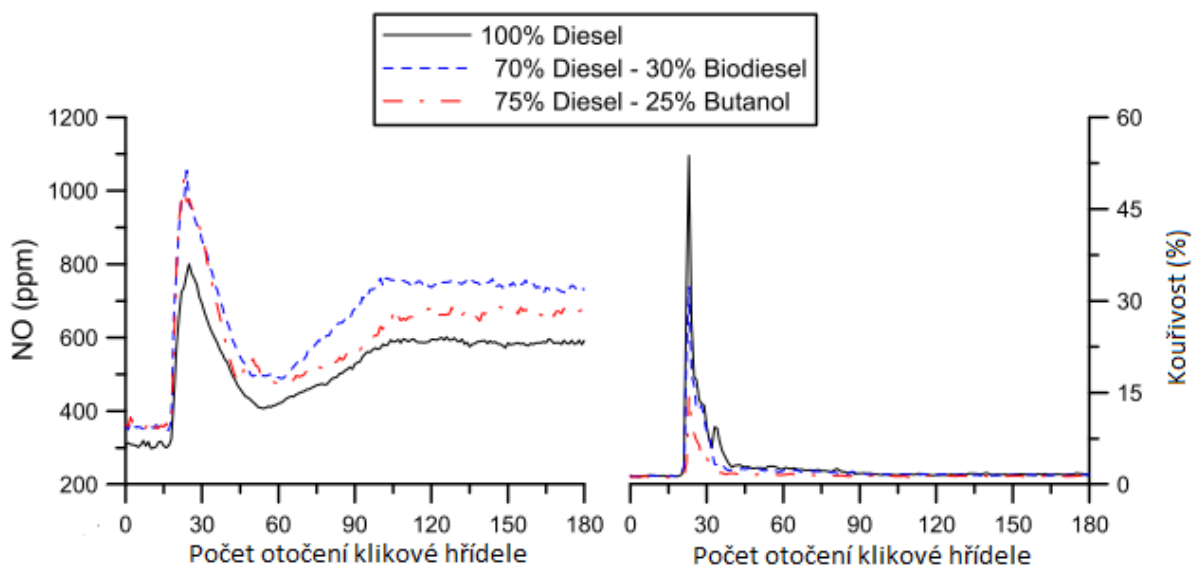




Obrázek 15 - Produkce emisí  $\text{NO}_x$  a kouřivost v závislosti na zatížení motoru a použitém palivu (upraveno, přeloženo [83])

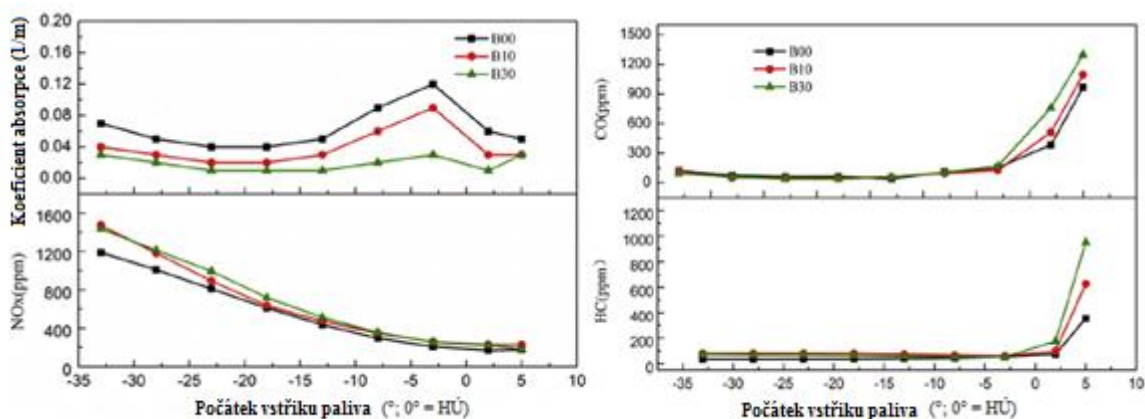
Podobného vlivu na emise lze dosáhnout aditivací motorové nafty biobutanolem. Ten se ve směsi s motorovou naftou chová velmi podobně a v některých ohledech jsou jeho vlastnosti výrazně lepší. V porovnání s bioethanolem má butanol vyšší výhřevnost, vyšší cetanové číslo, je méně těkavý, disponuje větší viskozitou a vyšším bodem vzplanutí. Navíc ve směsi s motorovou naftou nedochází k vážnému oddělování složek, jako v případě bioethanolu.[84]

Přechodové jevy ve vznětovém motoru provozovaném na směs motorové nafty a butanolu zkoumal Rakopoulos a kol. [85]. Testovaným motorem byl 6-válec o objemu  $5958 \text{ cm}^3$  a výkonu 177 kW. Během akcelerací byla měřena především produkce PM a  $\text{NO}_x$ . Vybraná část výsledků je znázorněna na obrázku 16. Zde je vyjádřen průběh akcelerace vně nezatíženého motoru z počátečních  $1530 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  na konečných  $2055 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Nárůst produkce NO (hlavní složky  $\text{NO}_x$ ) a pokles kouřivosti je zřejmý.[85]



Obrázek 16 - Závislost kouřivosti a produkce NO na koncentraci butanolu (převzato, upraveno) [85]

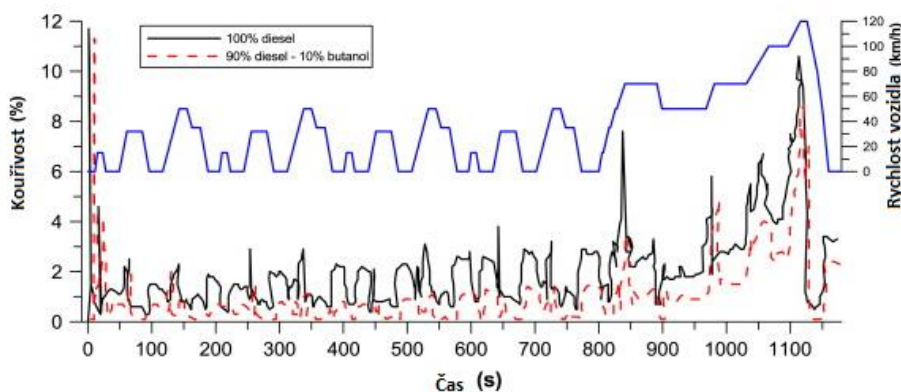
Závislost produkce CO, NO<sub>x</sub>, HC a kouřivosti na okamžiku vznícení směsi při různých koncentracích butanolu zkoumal Cheng a kol. [86]. N-butanol v motorové naftě byl testován ve 4-válcovém motoru o objemu 4 750 cm<sup>3</sup>. Butanol byl testován ve směsi 10 % a 30 % butanolu. Výsledky měření ukazují, že n-butanol ve směsi s naftou snižuje kouřivost motoru. Ostatní sledované parametry (viz. obrázek 17), tedy CO, HC a NO<sub>x</sub>, vykazují mírný nárůst.



Obrázek 17 - Závislost produkce CO, NO<sub>x</sub>, HC a kouřivosti na okamžiku zapálení směsi (upraveno, přeloženo [86])

Výzkum dopadů použití motorové aditivované motorové nafty na kouřivost provedl Kozak [87]. Experiment byl proveden podle předpisů NEDC (New European Driving

Cycle) s použitím vozidla s běžným, přeplňovaným, vznětovým motorem. Vybrané výsledky jsou zobrazeny na obrázku 18, je zde patrný značný pokles kouřivosti při použití 10% směsi butanolu a motorové nafty. Za povšimnutí stojí prvních několik desítek sekund jízdy na směsné palivo (na obrázku je kouřivost během jízdy znázorněna červenou, čárkovanou čarou). Během těchto přibližně 30 sekund byla kouřivost motoru řádově větší než ve všech následujících režimech. To může způsobeno tím, že motor byl před měřením studený. [87]



Obrázek 18 - Vliv butanolu na kouřivost (převzato, upraveno) [87]

### Dílčí závěry využití alkoholů, jako aditivací motorové nafty

Přínos butanolu na produkci emisí vznětových motorů lze shrnout do několika bodů. Nižší podíl kyslíku v molekule butanolu je vhodnější pro použití ve vznětových motorech. To vede k výraznému snížení produkce PM. Podle studií může pokles produkce PM dosáhnout až 73 %. [85] Tento výsledek je spíše ojedinělý. Ovšem běžně lze dosáhnout poklesu produkce PM od 10 do 60 %. [87][88][84]

Butanol jako aditivum v motorové naftě má negativní vliv na produkci  $\text{NO}_x$ . Autoři předešlých výzkumů během svých měření zaznamenali shodně nárůst emisí  $\text{NO}_x$  v rozmezí 12 – 36 % (nezávisle na použitém motoru). [85][87] Opačných výsledků, tedy snížení produkce  $\text{NO}_x$  dosáhli [89], [90] a [91]. Pokles emisí  $\text{NO}_x$  nebyl zásadní, většinou se jednalo o několik procent, řádově do 15 %. [91]

Z výsledků je patrné, že použití butanolu jako aditiva v motorové naftě je možné. Pravděpodobně dojde k výraznému poklesu produkce PM a mírnému nárůstu produkce  $\text{NO}_x$ .

V porovnání s výzkumy zabývajícími se vlivem bioethanolu v motorové naftě je výzkum vlivu butanolu ve svých počátcích. Vzhledem k vhodným vlastnostem butanolu, hlavně jeho dobré mísitelnosti s motorovou naftou a relativně vysoké výhřevnosti, se jedná o velmi vhodný doplněk k motorové naftě. Jak ukazují rozdíly ve výsledcích, je potřebný další výzkum, který provede hlubší analýzu daných jevů. Z těchto důvodů je směs butanol a motorové nafty jedním z hlavních bodů, které budou v disertační práci zkoumány.

### **Využití rostlinných olejů a produktů z nich ve vznětových motorech**

Využití rostlinných olejů (RO) je možné v čisté formě nebo jako aditiva do motorové nafty. Spalování RO v jejich čisté podobě přináší několik problémů. Z důvodů vyšší viskozity dochází během vstřiku k horšímu rozprášení paliva, což má za následek obtížnější regulaci motoru.[92][93]

Problémy s viskozitou se dají řešit několika cestami:

- Pyrolýzou
- Mikro-emulzifikací
- Ředěním
- Transesterifikací

Pyrolýza je první a nejjednodušší z procesů zpracování RO. Jedná se o proces, při kterém je jedna látka přeměna na jinou působením tepla a katalyzátoru. [94][95]

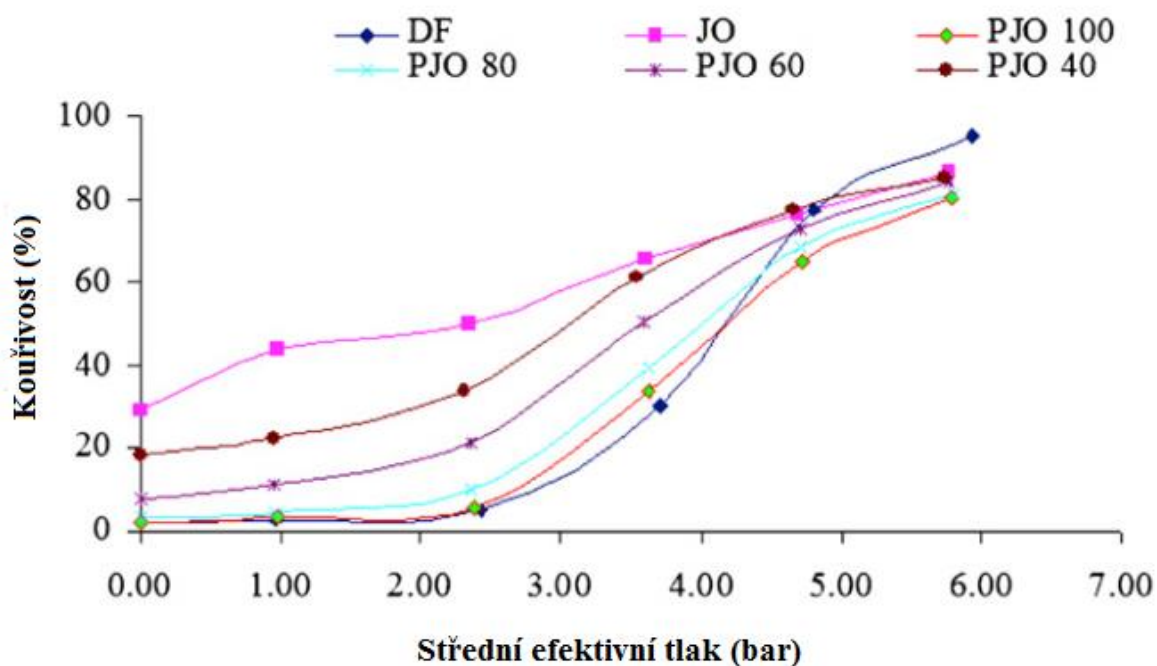
Mikro-emulzace je proces při kterém dochází k vytváření mikro-emulzí. Částice v mikro-emulzi mají většinou rozměr 1 – 150 nm.[96] Vznik mikro-emulzí má za následek zlepšení vlastností paliva. Takováto paliva se nazývají „hybridní paliva“.[97]

Transesterifikace byla již popsána v kapitole 2.3.6. Nejběžnějším produktem transesterifikace je FAME a v podmínkách ČR MEŘO. O „bionaftě“ se mluví v případě, že je použit 100% podíl FAME (MEŘO).

Vzhledem k tomu, že motorovou naftu lze aditivovat FAME až do její 100% náhrady je FAME vhodným kandidátem jako její alternativa. Bylo již realizováno mnoho výzkumů,

kteře porovnávaly provozní parametry vznětového motoru v závislosti na koncentraci FAME. [9][98][99]

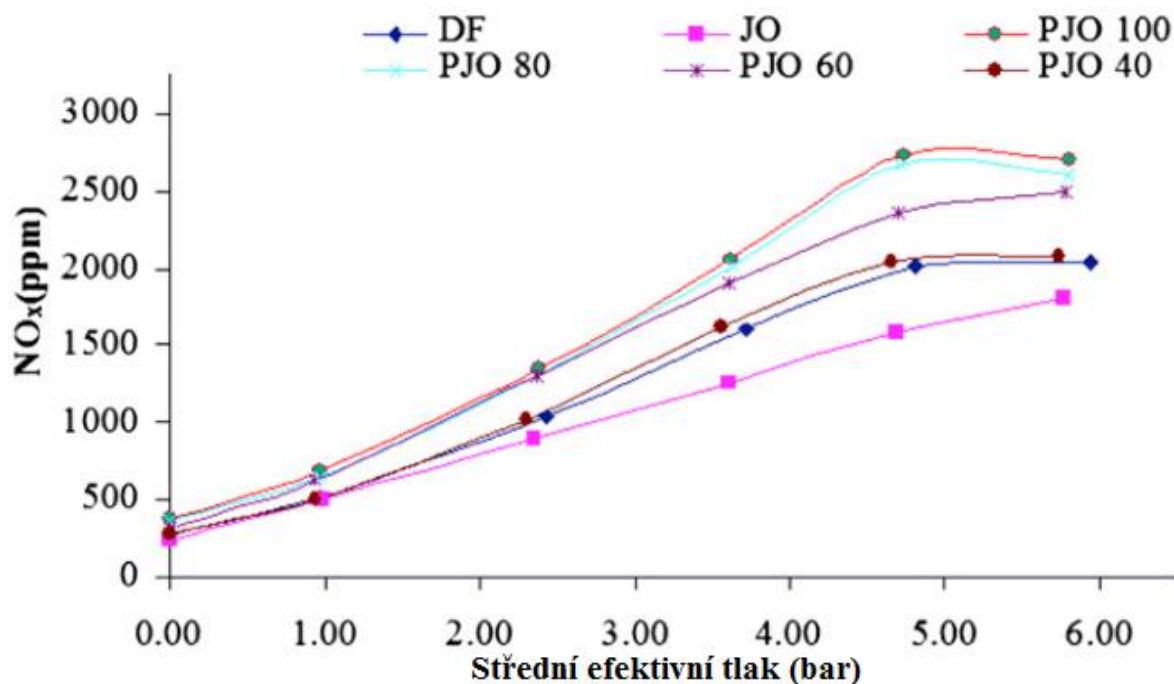
Experiment, který zjišťoval závislost produkce emisí  $\text{NO}_x$  a kouřivosti na teplotě biopaliva provedl v roce 2010 Chauhan a kol. [59]. Pro experiment byl použit motor DAF 8 o výkonu 5,9 kW, který spaloval čistý olej ze semen Jatrophy (*Jatropha curcas*) při různých teplotách paliva. Vybraná část výsledků je na obrázcích 19 a 20. Obrázek 19 zobrazuje závislost kouřivosti na středním efektivním tlaku a použitém palivu, jeho teplotě. Je zde patrný nárůst kouřivosti až o několik desítek procent při použití biopaliva.



Obrázek 19 - Vliv kouřivosti v závislosti na středním efektivním tlaku a použitém palivu [59]

DF – čistá nafta; JO – čistá Jatropha; PJO 40, 60, 80 a 100 – přehřátá Jatropha (40, 60, 80 a 100 °C)

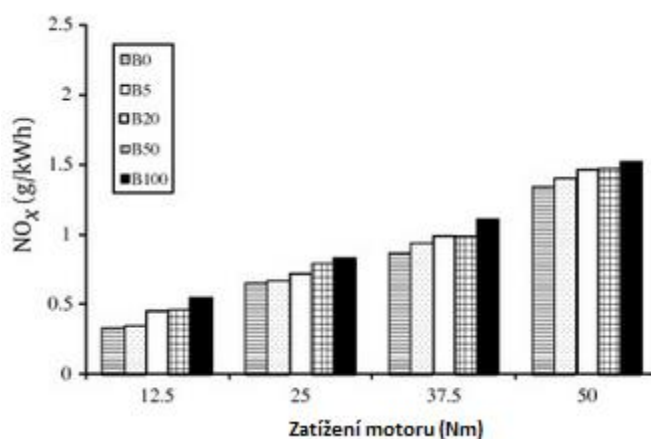
Obrázek 20 zobrazuje závislost produkce emisí  $\text{NO}_x$  na středním efektivním tlaku a teplotě Jatrophy. V tomto případě studená Jatropha dosáhla nejnižší produkce emisí  $\text{NO}_x$  v některých režimech až o 1 000 ppm.



Obrázek 20 - Vliv produkce emisí NO<sub>x</sub> na středním efektivním tlaku a použitém palivu [59]

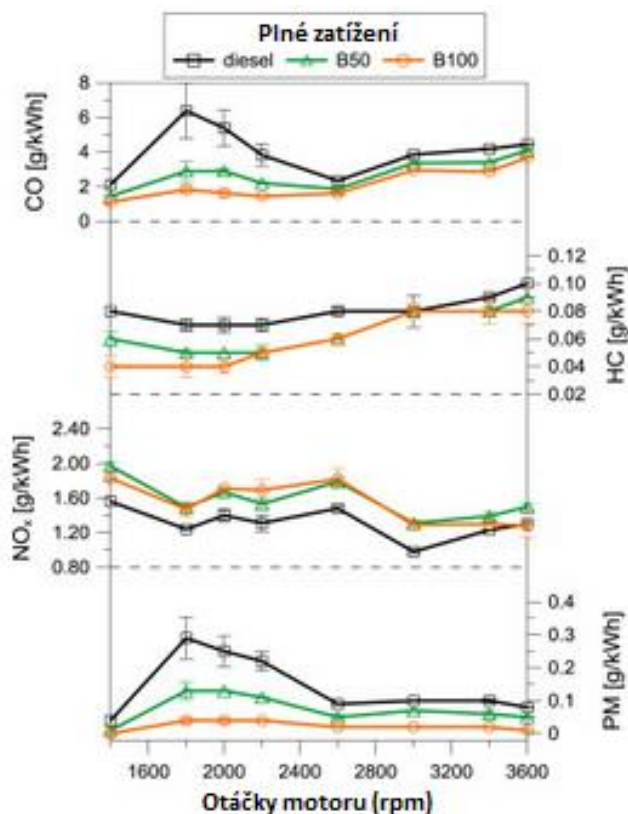
DF – čistá nafta; JO – čistá Jatropha (25°C); PJO 40, 60, 80 a 100 – přehřátá čistá Jatropha (40, 60, 80 a 100 °C)

Podobně jako v případě aditivace motorové nafty alkoholem, i v případě použití FAME dochází k nárůstu produkce NO<sub>x</sub>. [100][9][101][102] Nepříznivý vliv na produkci NO<sub>x</sub> je pravděpodobně způsoben vyšší teplotou výfukových plynů. [99] Na obrázku 21 je znázorněn nárůst produkce NO<sub>x</sub> v závislosti na zatížení motoru a obsahu butanolu. Výzkum provedl v roce 2012 Gumus a kol.. [9]



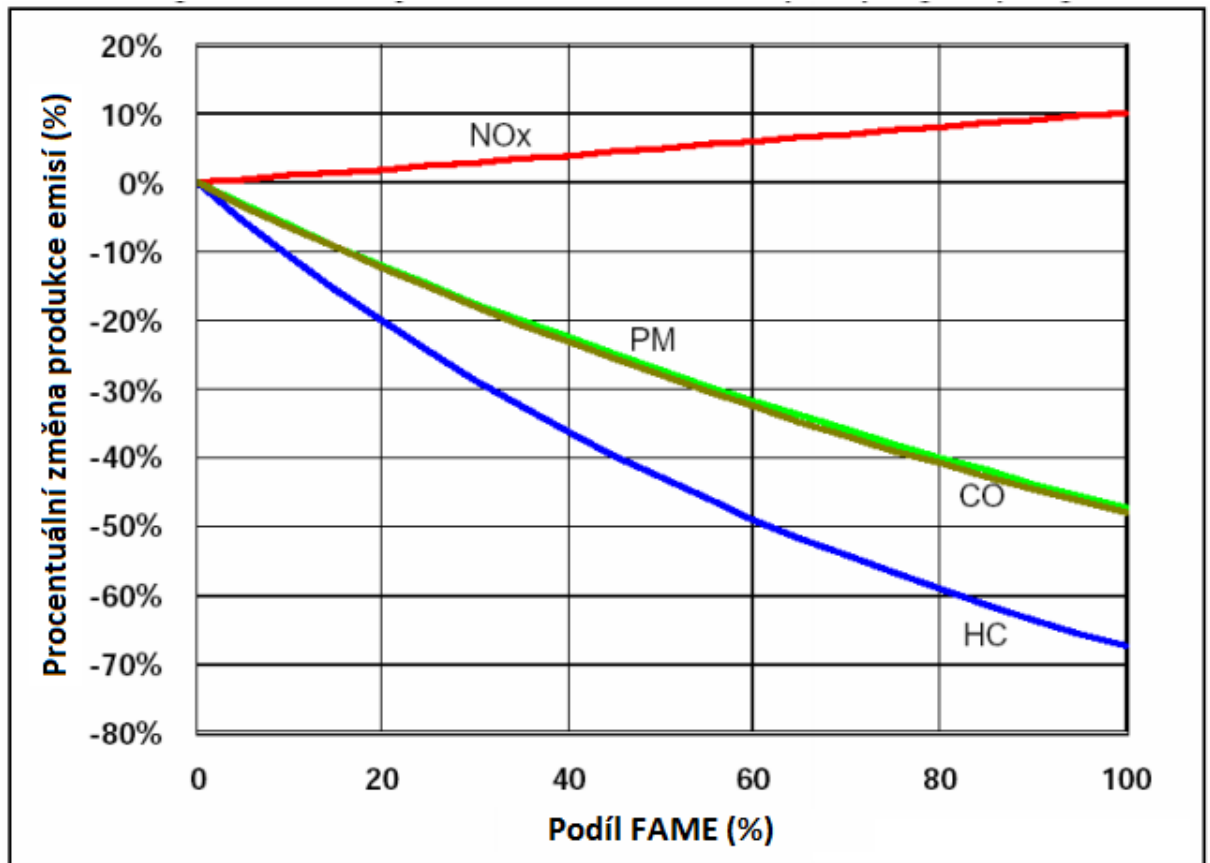
Obrázek 21 - nárůst produkce NO<sub>x</sub> v závislosti na zatížení motoru (převzato, upraveno) [9]

Výzkum vlivu podílu FAME v motorové naftě na emise vznětového motoru provedl Magno a kol. v roce 2015 [103]. Pro experiment byl použit tříválcový motor o objemu 1 028 cm<sup>3</sup>. Použitá paliva byla bionafta, 50% směs FAME a motorová nafta a jako referenční palivo byla použita čistá motorová nafta. Obrázek 22 zobrazuje závislost produkce emisí CO, HC, NO<sub>x</sub> a PM na otáčkách a použitém palivu. Jedinou složkou, kde byl prokázán negativní dopad, byly emise NO<sub>x</sub>, kde došlo k nepatrnému nárůstu.



Obrázek 22 - Závislost produkce emisí na otáčkách motoru a použitém palivu [103]

Velice zajímavou studii, pro potřeby této práce, provedl v roce 2002 Bob McCormick [104]. Jeho studie se zabývala vlivem podílu FAME v motorové naftě na produkci emisí NO<sub>x</sub>, CO, PM a HC. Výsledky jeho studie lze stručně shrnout do grafu na obrázku 23. Experimenty, které studoval, byly prováděny s využitím motorů vyrobených před rokem 1997. Z obrázku je patrné, že u motorů starší konstrukce lze očekávat nárůst produkce emisí NO<sub>x</sub> a to až o 10%. Dále lze předpokládat pokles produkce PM přibližně na polovinu.



Obrázek 23 - Vliv podílu FAME na produkci emisí (přeloženo) [104]

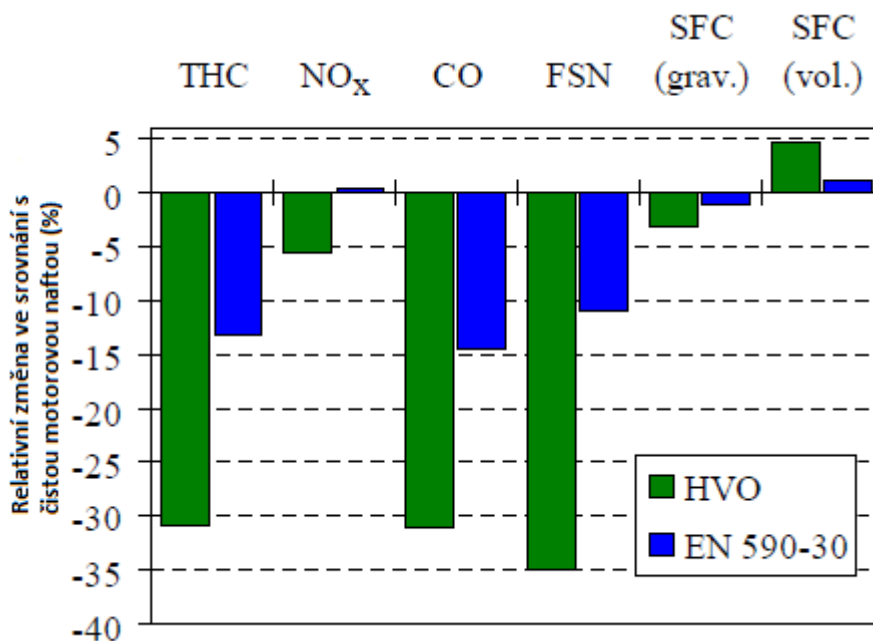
V případě, že je z rostlinného oleje odstraněn kyslík, vznikne palivo zvané hydrogenovaný rostlinný olej. HVO lze použít podobně jako FAME, to znamená, že může být použit jako aditivace motorové nafty a to až do 100% koncentrace.[105][106]

HVO spalované ve vznětových motorech má za následek snížení většiny regulovaných i neregulovaných emisí. V závislosti na koncentraci HVO může dojít ke snížení emisí HC, CO i PM. [105][107][106] Podobně jako při použití FAME může být vliv na emise NO<sub>x</sub> sporný.[108]

Při vhodné koncentraci je vliv HVO na NO<sub>x</sub> pozitivní.[106][109] Během výzkumu [109] porovnával vliv podílu HVO v motorové naftě na produkci emisí. Měření bylo provedeno s motorem o objemu 8,4 dm<sup>3</sup> o výkonu 225 kW. Během experimentu provozoval motor na čisté HVO a směsné palivo EN 590-30 (70 % motorové nafty a 30 % HVO). Výsledky měření porovnával s výsledky při použití čisté motorové nafty. Výběr z výsledků jsou zobrazeny na obrázku 23. Emise NO<sub>x</sub> byly nižší o 5 % při použití čistého HVO, zatím co při použití EN



590-30 došlo k nepatrnému nárůstu. Kouřivost na čisté HVO klesla o téměř 35 %, zatím co při použití EN 590-30 pouze o 10%. Nespálené uhlovodíky a oxid uhelnatý také vykazují signifikantní pokles.



Obrázek 24 - Relativní změna produkce emisí v porovnání s motorovou naftou [109]

(THC – Total HydroCarbon [Nespálené uhlovodíky], FSN – Filter Smoke Number [kouřivost], SFC – Specific Fuel Consumption [spotřeba paliva])

Během rozsáhlého výzkumu porovnával [110] vliv podílu HVO na emise NO<sub>x</sub> a PM. Během výzkumu bylo zkoumáno 300 městských autobusů při provozu na čisté HVO a 30% směs HVO a motorové nafty (stejně palivo, jako výše zmíněné EN 590-30 [109]). Střední hodnota snížení produkce NO<sub>x</sub> byla 10 % a pro PM 30 % v porovnání s běžnou motorovou naftou.

## **Dílčí závěry využití biopaliv na bázi olejů**

Rostlinné oleje v čisté formě nejsou vhodnou alternativou k motorové naftě. [92][93] Úpravo RO lze získat biopaliva FAME a HVO, které lze již bez vážnějších problémů spalovat ve vznětových motorech.

Vliv FAME a HVO na emise spalovacích motorů lze shrnout do několika bodů. Byl prokázán pozitivní přínos HVO na produkci pevných částic. Zde může dojít k poklesu kouřivosti motoru o 30 – 35 %. [109][110] Vliv HVO na emise  $\text{NO}_x$  je sporný a nelze zcela určitě rozhodnout, zdali je pozitivní nebo negativní. Někteří autoři dosáhli snížení produkce  $\text{NO}_x$  s použitím čistého HVO. [109][110] Může však dojít k nepatrnému nárůstu. [109]

FAME má již od velmi malých koncentrací velký vliv na produkci některých emisí. Výrazným způsobem ovlivňuje kouřivost vznětového motoru. 20% směs FAME s motorovou naftou měla za následek snížení kouřivosti o necelých 20 %.[99] Tento výsledek potvrzuje i výzkum [9][100]. Přibližně 40% poklesu kouřivosti dosáhl [111]. U směsí 20 – 45 % FAME v motorové naftě se může kouřivost snížit až o 70 %. [112] Opačných výsledků, tedy nárůstu produkce PM, dosáhli autoři [113][114]. Většina autorů, kteří zaznamenali nárůst produkce PM, tento jev vysvětluje jinou viskozitou paliva, které se pak hůře rozprašuje.[115][116][59]

Zásadním prvkem, který má vliv na tvorbu emisí  $\text{NO}_x$  je technologie tvorby směsi. Při použití systému čerpadlo-tryska lze předpokládat nárůst produkce emisí  $\text{NO}_x$  z důvodů vyššího modulu objemové stlačitelnosti FAME. U motorů využívajících systém common rail se tento jev nemůže vyskytovat. U systému čerpadlo-tryska lze nárůst produkce emisí  $\text{NO}_x$  snížit úpravou paliva. Navýšením cetanového čísla lze dosáhnout snížení produkce  $\text{NO}_x$ . Další možností jak snížit produkce je posun úhlu předstříku. [117][118]

## **Dílčí závěry využití biopaliv**

Použití biopaliv ve spalovacích motorech může přinést značné snížení produkce emisí. Pozitivní vliv na skleníkový efekt by mělo snížení emisí CO<sub>2</sub>. Spalování biopaliv má značný potenciál této redukce dosáhnout. Jak plyne z rešerše, velice důležitým krokem před skutečně masivním použitím biopaliv je nalezení vhodného biopaliva. Čistá biopaliva mají v porovnání s jejich fosilními předchůdci většinou nižší emise. Pro lepší využití biopaliv je nezbytné vytvořit takové palivo, které bude mít optimální vlastnosti pro využití ve spalovacích motorech. To přímo vybízí k vytváření a testování směsných biopaliv. Taková paliva by mohla kombinovat pozitivní přínosy jednotlivých složek a naopak potlačovat jejich negativní vlastnosti. Nalezení vhodného směsného biopaliva je vhodným krokem před optimalizováním motoru, který by pak dokázal optimálně využít vlastnosti navrženého paliva.

### 3. CÍLE PRÁCE

Výše popsaná problematika vysvětluje vznik stále sílícího tlaku na konstruktéry i uživatele vozidel směřujícího ke snižování produkce škodlivých emisí a spotřeby fosilních paliv. Často jde o protichůdná opatření, kdy se často podaří jednu složku účinně omezit, přičemž dojde k nárůstu produkce jiné škodlivé složky. To je velmi patrné při porovnání produkce  $\text{NO}_x$  a  $\text{CO}_2$ . Obě složky jsou limitované legislativními předpisy. Pro účely této práce bude produkce  $\text{CO}_2$  nahrazena porovnáním spotřeby paliva, které je při zanedbání produktů nedokonalého spalování přímo úměrné produkci  $\text{CO}_2$ .

Další řešenou problematikou je produkce pevných částic. V posledních letech se ukazuje značně nebezpečný potenciál PM. Mnoho vědeckých týmů po celém světě se snaží porozumět komplexním mechanismům tvorby PM, jejich reakcím s PAH a nakonec i vlivům PAH na lidské zdraví. Celý zkoumaný řetězec je velice složitý a použití biopaliv do něj zanáší další neznámé parametry.

Tato práce navazuje na již realizované experimenty, které proběhly na Technické fakultě ČZU. [34][35][121][123][125] Klade si za cíl doplnit a rozšířit informace o vlivu biopaliv na produkci emisí spalovacího motoru, díky čemuž pak bude možné určit, jaké biopalivo má potenciál být přínosem pro životní prostředí.

Dílčí cíle disertační práce:

- Ověření funkce a výkonových parametrů u motorů při provozu na směsná biopaliva.
- Analýza produkce vybraných plynných emisí spalovacích motorů při použití směsných biopaliv.
- Analýza produkce pevných částic spalovacích motorů při použití směsných biopaliv.

Z těchto cílů vycházejí následující hypotézy:

*Hypotéza 1.*

Použitá biopaliva nemají podstatný vliv na spotřebu vznětového motoru.

*Hypotéza 2.*

Použitá biopaliva nemají podstatný vliv na produkci pevných částic a jejich velikostní spektrum.

*Hypotéza 3*

Použitá paliva nemají podstatný vliv na produkci NO<sub>x</sub>.

## 4. MATERIÁLY A METODY

Měření bylo realizováno s použitím vybavení a měřicích zařízení na Katedře vozidel a pozemní dopravy. Jak vyplynulo z provedené rešerše, mezi nejdůležitější zkoumané parametry patří spotřeba paliva, produkce pevných částic a emise NO<sub>x</sub>.

V této části práce jsou popsány jednotlivé kroky, které vedou k ověření nebo vyloučení jednotlivých hypotéz.

Prvním krokem bylo umístění a ustavení motoru. Dále připojení dalších měřicích zařízení a jejich kalibrace. Do výfukového potrubí za tlumič byly připojeny odběrné sondy pro analyzátor produkce pevných částic a analyzátor plynných emisí.

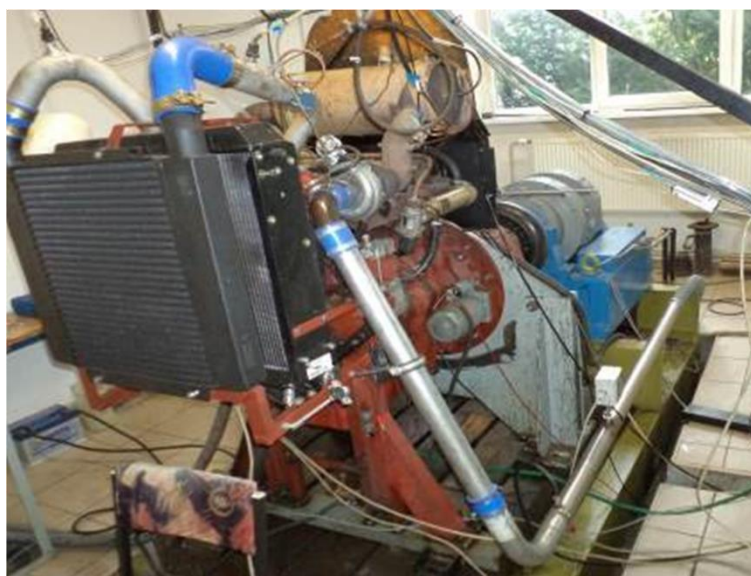
Palivová soustava motoru byla připojena k externí palivové nádrži, která byla umístěna na digitální váze s vyčítáním okamžité hodnoty, díky čemuž bylo možné sledovat spotřebu paliva v reálném čase.

#### 4.1 Testovaný motor

Testovaný motor byl Zetor 1505 . Jedná se o řadový 4-válec o objemu 4,156 l, který je přeplňován turbodmychadlem. Motor byl pro účely měření připojen k dynamometru využívajícího vířivých elektrických proudů s označením V250. Technické parametry motoru jsou uvedeny v tabulce 7 a ilustrační fotografie z měření na obrázku 24.

*Tabulka 7 - Technické parametry motoru Z 1505*

<b>Motor Z 1505</b>		
<b>Výkon</b>	90	kW
<b>Točivý moment</b>	525	Nm
<b>Počet válců</b>	4	
<b>Objem</b>	4 156	cm <sup>3</sup>
<b>Vrtání</b>	105	mm
<b>Zdvih</b>	120	mm
<b>Kompresní poměr</b>	17:1	
<b>Maximální otáčky</b>	2 200	ot.·min <sup>-1</sup>
<b>Úhel předvstříku</b>	9° před HÚ	
<b>Pořadí zapalování</b>	1 – 3 – 4 – 2	
<b>Měrná spotřeba paliva</b>	255	g·kW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>



*Obrázek 25 - Motor Z 1505*

## 4.2 Měřicí zařízení

Tato kapitola se věnuje popisu použitých měřících zařízení a jejich základním parametrům.

### 4.2.1 Vířivý dynamometr VD250

Vířivý dynamometr funguje na principu vířivých proudů, které způsobují brzdny moment, který působí proti spalovacímu motoru. Vířivá brzda využívá pro vytvoření brzdnych účinků vířivé proudy uzavřené nakrátko v tělese magnetického obvodu. Stator vířivé brzdy obsahuje cívku, která je protékána stejnosměrným proudem, který budí v magnetickém obvodu magnetický tok. Rotor vířivé brzdy má tvar ozubeného kola a je z ocele. Tím, že se rotor otáčí v magnetickém poli, dochází vlivem střídání mezer a zubů, ke změně magnetického odporu a tím i magnetického toku. Změna magnetického toku indukuje napětí v magnetickém obvodu. Toto napětí vede ke vzniku vířivých proudů. Velikostí proudu v budící cívce lze regulovat velikost brzdneho momentu, který vytvářejí vířivé proudy. Vířivou brzdu lze považovat za synchronní stroj, jehož počet pólů se rovná počtu zubů rotoru a počet fází je roven nekonečnu. Energie, která je dodávána zkoušeným motorem se v brzdě mění na teplo, které je třeba odvést pomocí chladicího systému. Technické parametry dynamometru V250 jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8 - Technické parametry dynamometru V250

<b>Dynamometr V250</b>		
<b>Provedení</b>	IP23/ICW37	
<b>Otáčky</b>	300 – 2500 – 8000	min <sup>-1</sup>
<b>Točivý moment</b>	268 – 956 – 299	Nm
<b>Výkon</b>	8,4 – 250 – 250	kW
<b>Průtok vody</b>	0,9	l·s <sup>-1</sup>
<b>Budící napětí</b>	91	V
<b>Budící proud</b>	1,7	A
<b>Tlak vody</b>	90	kPa
<b>Hmotnost</b>	550	kg
<b>Rok výroby</b>	1986	



Vířivá brzda je přes rameno připojena k tenzometru. Brzdný moment je tak převeden na lineární sílu, která je tenzometrem převedena na napětí. Toto napětí je přímo úměrné velikosti síly, která na tenzometr působí a je tak přímo úměrné brzdnému momentu brzdy. Při měření byl použit tenzometr S-22, jehož technické parametry jsou uvedeny v tabulce 9.

*Tabulka 9 - Technické parametry tenzometru S-22*

<b>Tenzometr S-22</b>		
<b>Jmenovité zatížení</b>	2	kN
<b>Jmen. měřicí signál</b>	2	mV/V
<b>Napájení</b>	5	Vdc
<b>Sloučená chyba</b>	0,2 - 0,8	%
<b>Teplotní rozsah</b>		
- kompenzovaný	-10 - +40	°C
- bezpečný	-20 - +60	°C

#### **4.2.2 Analyzátor plynných emisí**

Plynné emise byly měřeny pomocí infračerveného analyzátoru s Fourierovou transformací model Midac I1801-E, který je zobrazen na obrázku 25, jehož vybrané technické parametry jsou uvedeny v tabulce 10.

*Tabulka 10 - Vybrané technické parametry FTIR analyzátoru Midac I1801-E*

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
<b>Objem měřicí kyvety</b>	0,3 dm <sup>3</sup>
<b>Délka optické měřicí dráhy</b>	5,5 m
<b>Teplota vzorku</b>	191 °C
<b>Rozlišení</b>	0,5 cm <sup>-1</sup>



*Obrázek 26 - FTIR analyzátor Midac I1801-E*

### 4.2.3 Analyzátor pevných částic

Surové výfukové plyny byly ředěny v rotační ředičce (MD-19 Matter engineering, Švýcarsko). Koncentrace pevných částic v ředěných výfukových plynech byla zjišťována pomocí částicového velikostního analyzátoru EEPS (z angl. Engine Exhaust Particle Sizer) firmy TSI. Pro měření byl použit konkrétní model EEPS 3090, který je zobrazen na obrázku 26. Technické parametry jsou v tabulce 11.



Obrázek 27 - Částicový analyzátor TSI EESP 3090

Tabulka 11 - Vybrané parametry analyzátoru TSI EEPS 3090

Parametr	Hodnota
Rozsah velikostí částic	5.6 – 560 nm
Rozlišení	16 kanálů na dekádu (32 celkem)
Počet elektrometrů	22
Nabíjecí režim	Unipolární difúzní nabíječka
Vzorkovací frekvence	10 Hz
Průtok vzorku	10 l·min <sup>-1</sup>
Teplota vzorku	10 – 52 °C
Provozní teplota	0 – 40 °C
Tlak (autokorekce)	70 – 103 kPa

#### 4.2.4 Spotřeba paliva

Spotřeba paliva byla měřena gravimetrickou metodou pomocí plošinové váhy SOEHNLE Professional 9121.04.040, jejíž technické parametry jsou uvedeny v tabulce 12. Externí palivová nádrž byla umístěna na váze, jejíž signál byl zaznamenáván pomocí softwaru DataLab. Vzorkovací frekvence váhy byla 1 Hz.

*Tabulka 12 - Technická specifikace váhy*

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
<b>Rozsah</b>	0 – 32 kg
<b>Dílek</b>	1 g
<b>Pracovní teplota</b>	-10 až 40 °C
<b>Datové rozhraní</b>	RS - 232

#### 4.3 Testovaná paliva

Během experimentů byla použita biopaliva v čisté formě i ve formě směsi s klasickým fosilním palivem.

Základním fosilním palivem je motorová nafta splňující normu ČSN EN 590 bez biosložky.

Použitá biopaliva byla:

- Bionafta (MEŘO, FAME)
- HVO
- Bioethanol

Paliva a směsná paliva použitá v experimentech jsou pro zjednodušení označena kódem, který jednoduše umožňuje rozeznat složení použitého paliva. Pro přehlednost je v tabulce 13 uvedeno značení a složení použitých paliv. Číslo v kódu označuje hmotnostní podíl paliva ve směsi.

Tabulka 13 - Použitá paliva a jejich složení

Značení	Složení	Podíl složek
<b>d90e10</b>	Motorová nafta Bioethanol	90 % 10 %
<b>hvo100</b>	Hydrogenovaný rostlinný olej	100 %
<b>d90hvo05mero05</b>	Motorová nafta Hydrogenovaný rostlinný olej MEŘO	90 % 5 % 5 %
<b>d80e10mero10</b>	Motorová nafta Bioethanol MEŘO	80 % 10 % 10 %
<b>d50hvo50</b>	Motorová nafta Hydrogenovaný rostlinný olej	50 % 50 %
<b>mero50hvo50</b>	MEŘO Hydrogenovaný rostlinný olej	50 % 50 %

Koncentrace jednotlivých podílů biosložek v palivech byly určeny na základě nařízení EU pro nízkoprocentní biopaliva, dále jako inspirace pro návrhy koncentrací jednotlivých složek posloužila vypracovaná rešerše. Zdůvodnění proč byly vybrány právě tyto podíly složek a biosložek v palivu je následující:

**d90e10** – nízkoprocentní podíl bioethanolu v motorové naftě.

**hvo100** – kompletní náhrada fosilní motorové nafty za biopalivo, HVO má potenciál být vhodnou alternativou k fosilní naftě.

**d90hvo05mero05** – nízkoprocentní podíl HVO a MEŘO v motorové naftě. Palivo navržené s cílem minimalizovat plynné a pevné emise při spalování v motoru, které respektuje současné možnosti výroby alternativních paliv.

**d80e10mero10** – nízkoprocentní podíl bioethanolu a MEŘO v motorové naftě. Palivo navržené jako následovník paliva **d90e10** s podílem MEŘO, jako biopaliva na bázi oleje.

**d50hvo50** – vysokoprocentní podíl HVO v motorové naftě byl zvolen jako alternativa k dnes běžně používaným vysokoprocentním směsím motorové nafty a MEŘO.

**mero50hvo50** – čisté biopalivo navržené tak, aby snižovalo nároky na množství vyrobeného HVO, současně využívá již zaběhnuté MEŘO.

Na zkoumaných biopalivech byly provedeny testy pro zjištění základních palivářských vlastností. Testy byly prováděny dle norem, které jsou uvedeny v tabulce. Výsledky testů jsou uvedeny v tabulce 14.

Tabulka 14 - Základní palivářské vlastnosti zkoumaných paliv

	motorová nafta	d90e10	hvo100	d90hvo05 mero05	d80e10 mero10	d50 hvo50	mero50 hvo50
<b>Hustota při 15 °C</b> [kg·m <sup>-3</sup> ] Dle EN ISO 3675.	834	829	780	833	828	810	828
<b>Viskozita</b> [mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] Dle EN ISO 3104	2,71	3,14	2,82	2,92	4,02	2,76	3,39
<b>Bod vzplanutí</b> [°C] Dle EN 22719	66	25	97	76	25	80	112
<b>Obsah vody</b> [mg·kg <sup>-1</sup> ]	119,5	14876,3	39,6	53,9	5268,7	43,4	155
<b>TVP</b> [°C]	-7	-4	-21	-7	-5	-10	-16
<b>CFPP</b> [°C] Dle EN 116	-23	-22	>-28	-21	-22	-23	>-25
<b>Celkové nečistoty</b> [mg·kg <sup>-1</sup> ]	21	22	6	21	19	14	24
<b>Cetanový index</b> Dle ISO 4264	53,2	32,3	91,2	52,2	50,5	65,9	66,8
<b>Hmotnostní výhřevnost</b> [MJ·kg <sup>-1</sup> ]	42,50	41,00	44,00	41,57	40,64	43,22	41,34
<b>Objemová výhřevnost</b> [MJ·l <sup>-1</sup> ]	35,46	34,04	34,32	34,71	33,95	34,89	34,42

- *TVP – teplota vylučování parafinů*
- *CTFF – filtrovatelnost (z angl.. Cold Filter Plugging Point)*

V závislosti různých výhřevnostech testovaných paliv lze předpokládat, že při zachování účinnosti motoru, dojde k změnám ve spotřebě paliva. Tato změna bude přímo úměrná rozdílům ve výhřevnostech pro jednotlivá paliva. Změnu ve spotřebě lze prokázat pouze v případě, že je rozlišitelná od jiných náhodných a systematických vlivů a tudíž statisticky významná. To však vyžaduje, aby nejistota měření byla relativně malá v porovnání s očekávanou změnou, jejíž zjištění je požadováno.

## 4.4 Měřicí metody

V tomto odstavci jsou stručně popsány způsoby statistického vyhodnocení dat a zvolená metodika samotného měření.

### 4.4.1 Statistické vyhodnocení dat

Pro statistickou analýzu byl vybrán dvojitý t-test, který se používá pro hodnocení experimentů, při kterých není známa střední hodnota základního souboru. Při tomto experimentu, kdy bylo jedno měření provedeno před pokusným zásahem a druhé po pokusném zásahu, vytvářejí porovnávaná data páry.

Při testování byly navzájem porovnávány sady dat zkoumané veličiny pro dané provozní parametry motoru při provozu na čistou motorovou naftu a druhá sada dat byla pro testované biopalivo.

Testovací kritérium se poté určí dle vzorce (10):

$$t = \frac{|\bar{x}|}{\sqrt{\frac{s^2}{n}}} \quad (10)$$

Kde:

$\bar{x}$  – aritmetický průměr

$s^2$  – rozptyl

$n$  – počet párů (v případě tohoto experimentu 6 párů prezentujících 6 testovaných paliv)

Takto získaná hodnota  $t$  je porovnána s hodnotou  $t_{1-\alpha/2}(v)$ , kde  $v = n - 1$ . Zvolená hladina významnosti je  $\alpha = 0,05$ .

Statistická analýza byla prováděna v programu MS Excel. Při vyhodnocení experimentů je uváděná hodnota  $p$ , která představuje pravděpodobnost nulové hypotézy o shodě obou řad měření (před a po změně paliva). V případě, že je hodnota  $p$  uváděná u výsledku větší než 0,05 není rozdíl mezi průměry obou řad statisticky významný a tudíž biopalivo nemá vliv na sledovaný parametr.

### 4.4.2 Zkušební cyklus

Zkušební cyklus vycházel z předpisu pro homologační cyklus NRSC (z angl. Non-Road Steady Cycle), který je součástí normy ISO 8178. Tato norma je mezinárodním standardem

pro měření emisí výukových plynů ze zařízení, která nejsou primárně určena pro provoz na pozemní komunikaci. ISO 8178 obsahuje sbírku zkušebních cyklů při ustálených režimech. Označeny jsou C1, C2, D1 atd. Tyto cykly jsou určeny pro různá zařízení a třídy motorů. Každý z cyklů představuje sekvenci několika režimů a přikládá jim různé váhové faktory. Zkušební cyklus ISO 8178 – C1 je určen pro zemědělské stroje a všeobecně je znám pod zkratkou NRSC nebo také jako „8 bodový test“. V tabulce 15 jsou uvedeny hodnoty pro nastavení provozních parametrů motoru při testu ISO 8178 – C1.

*Tabulka 15 - Nastavení měřících bodů pro ISO 8178 - C1*

<b>Bod</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
<b>Moment (%)</b>	100	75	50	25	10	100	75	50	25	10	0
<b>Otáčky</b>	Otáčky při jmenovitém výkonu					Otáčky při maximálním momentu					Volnoběh
<b>Váhový faktor</b>											
<b>C1</b>	0.15	0.15	0.15	-	0.1	0.1	0.1	0.1	-	-	0.15

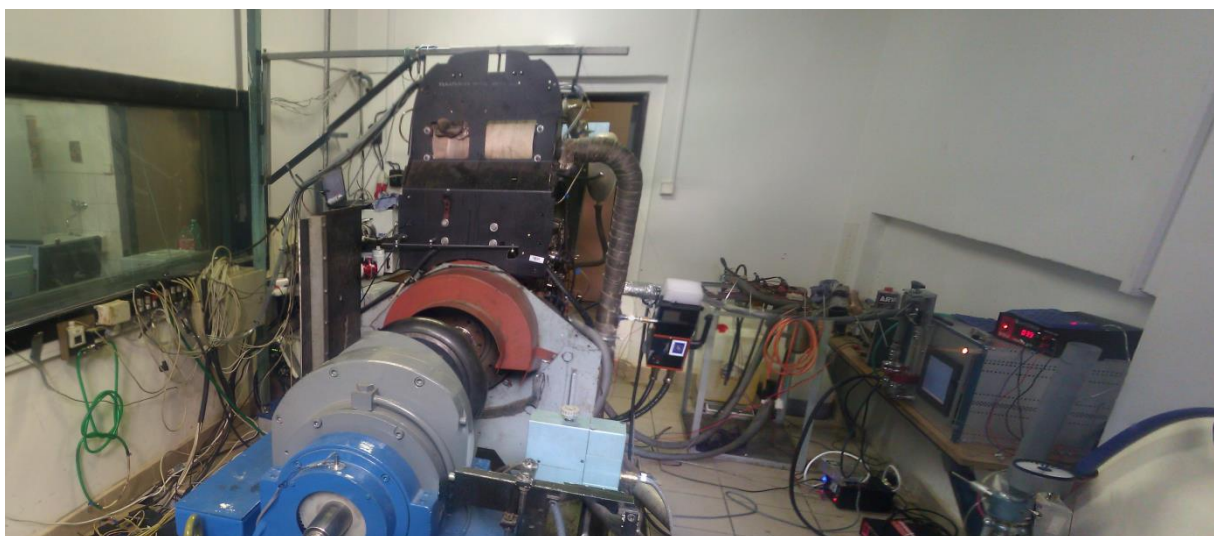
Prvním krokem potřebným k úspěšnému realizování cyklu NRSC je změření vnější otáčkové charakteristiky. Na základě dat z otáčkové charakteristiky byly stanoveny hodnoty pro jednotlivé měřící body cyklu NRSC.

Při běžném provádění cyklu NRSC je vybráno 8 bodů, které jsou dle normy zpracovány. Během měření bylo prováděno měření ve všech 11 základních bodech NRSC testu. Navíc bylo toto měření rozšířeno o další měřící bod, kterým je zvýšený volnoběh při  $1\,200\text{ min}^{-1}$ . Který reprezentuje stavy motoru při využívání příslušenství traktoru např. dofukování kol pomocí kompresoru. Tabulka 16 ukazuje celý předpis ustálených bodů měření.

Tabulka 16 – Navržený zkušební cyklus

Bod	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Moment (%)	100	75	50	25	10	100	75	50	25	10	0	0
Otáčky	Otáčky při jmenovitém výkonu					Otáčky při maximálním momentu					Volno běh	1200 min <sup>-1</sup>

Na obrázku 27 je celkový pohled na měřicí stanoviště osazené motorem, který je připojen k vířivému dynamometru a ostatním měřicím zařízením.



Obrázek 28 - Celkový přehled měřícího stanoviště

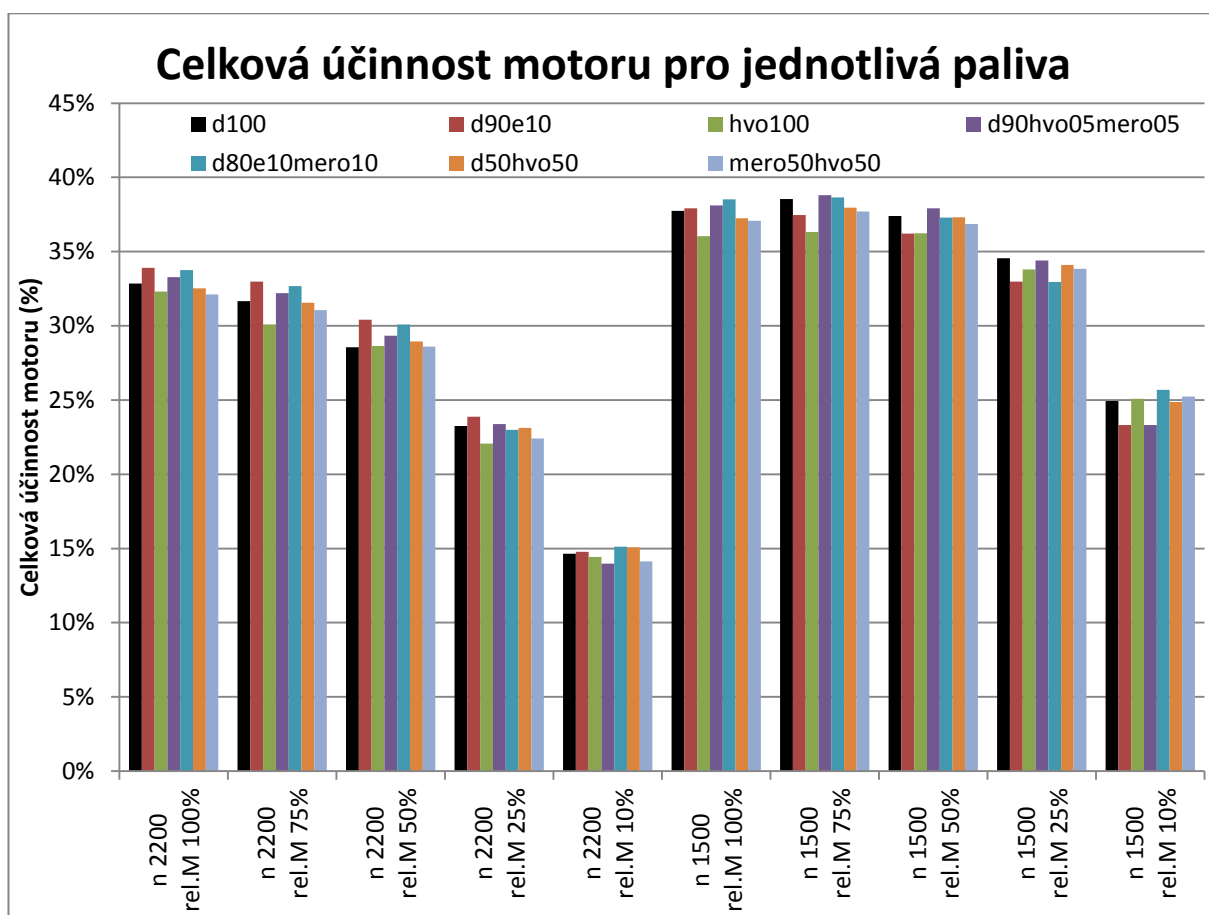


## 5. VÝSLEDKY

Kapitola představující výsledky je rozdělena do tří částí postupně podle toho, která z navržených hypotéz je zkoumána. Jednotlivé kapitoly tedy řeší spotřebu paliva, analýzu koncentrací PM a produkci emisí NO<sub>x</sub>.

### 5.1 Spotřeba paliva

Během měření byla zjišťována spotřeba paliva pomocí gravimetrického měření. Získaná data byla přepočítána na celkovou účinnost motoru, aby byla kompenzována rozdílná výhřevnost jednotlivých použitých paliv a směsí, výsledky jsou uvedeny na obrázku 28 a následně jsou uvedeny výsledky statické analýzy v tabulce 17.



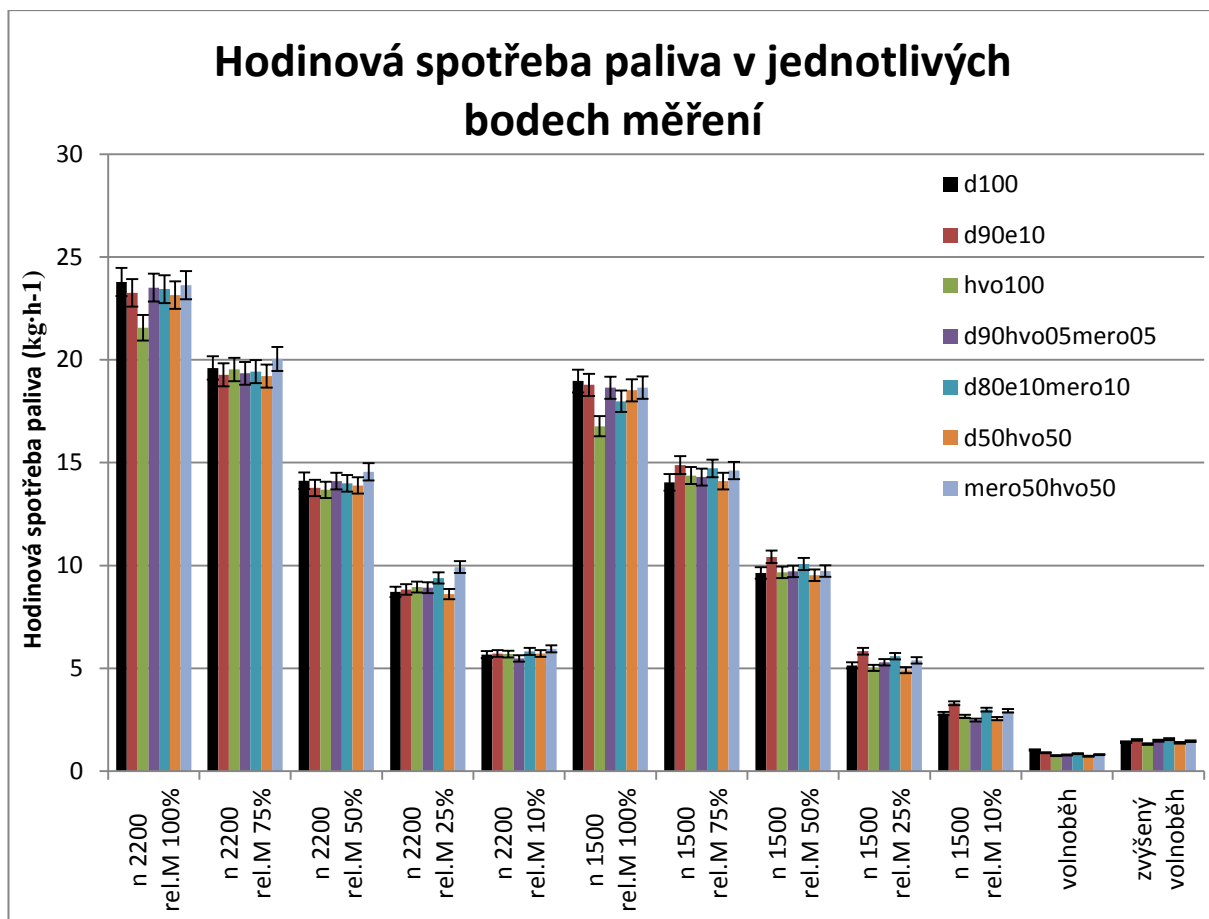
Obrázek 29 - Celková účinnost motoru pro jednotlivá paliva

Tabulka 17 - Výsledky statistické analýzy pro celkovou účinnost motoru v závislosti na použitém biopalivu

Palivo	$p$	H <sub>10</sub> : Použitá biopaliva nemají vliv na energetický příkon paliva
<b>d90e10</b>	0.972	Potvrzena nulová hypotéza
<b>hvo100</b>	0.777	Potvrzena nulová hypotéza
<b>d90hvo05mero05</b>	0.205	Potvrzena nulová hypotéza
<b>d80e10mero10</b>	0.105	Potvrzena nulová hypotéza
<b>d50hvo50</b>	0.256	Potvrzena nulová hypotéza
<b>mero50hvo50</b>	0.526	Potvrzena nulová hypotéza

Analýza pomocí dvouvýběrového, párového t-testu, na hladině významnosti  $\alpha = 5 \%$ , neprokázala významný vliv testovaných biopaliv na celkovou spotřebu paliva. Přesto lze z grafů na obrázku 28 a 29 vyčíst, že použitá biopaliva mohou mít vliv na celkovou účinnost. Hlavně v režimech volnoběžných otáček, kde došlo k nárůstu účinnosti přibližně o 10% při použití **d50hvo50** ve srovnání s čistou motorovou naftou. Při spalování čistého HVO došlo ve většině režimů ke snížení účinnosti do 2%. Obecně lze prohlásit, že rozdíly v celkové účinnosti motorů se při použití výše uvedených biopaliv ve srovnání s čistou motorovou naftou lišily maximálně o 2 – 3 %.

Pro přehlednější a přímější zobrazení dat lze získaná data použít pro výpočet hodinové spotřeby paliva. Na obrázku 30 jsou uvedeny výsledky měření pro jednotlivé body měření v závislosti na použitém biopalivu, výsledky statistické analýzy jsou uvedeny v tabulce 31. Z obrázku je patrné, že provozování motoru na palivo **hvo100** vedlo ke snížení hodinové spotřeby paliva o více než  $2 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ . Těchto výsledků bylo dosaženo při režimech maximálního zatížení. Nárůst hodinové spotřeby paliva byl zaznamenán u paliva **mero50hvo50** v režimech s vysokými otáčkami a středním zatížením, konkrétně 75%, 50% a 25%. V těchto případech došlo k nárůstu spotřeby paliva o přibližně  $0,8 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ .



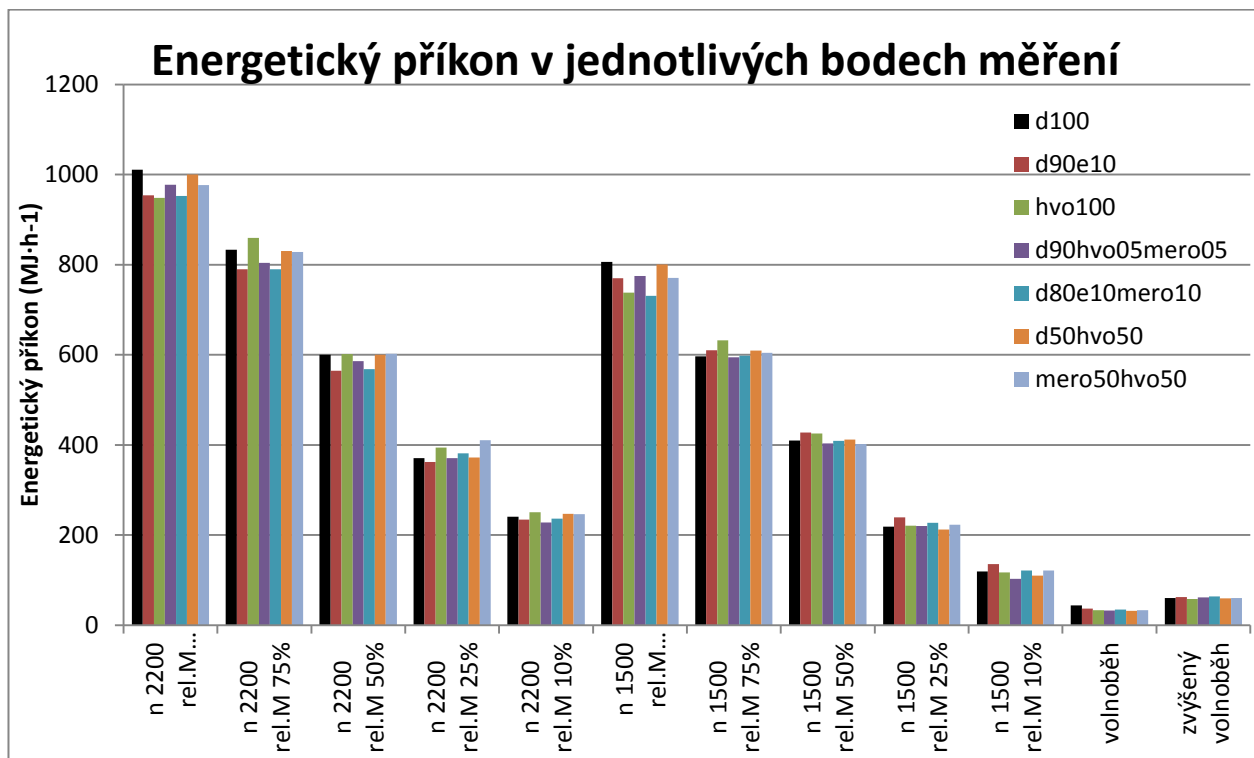
Obrázek 30 - Hodinová spotřeba paliva, v závislosti na použitém biopalivu

Tabulka 18 - Výsledky statistického analýzy hodinové spotřeby paliva v jednotlivých bodech měření v závislosti na použitém biopalivu

Palivo	$p$	H1 <sub>0</sub> : Použitá biopaliva nemají vliv na energetický příkon paliva
d90e10	0.360	Potvrzena nulová hypotéza
hvo100	0.125	Potvrzena nulová hypotéza
d90hvo05mero05	0.264	Potvrzena nulová hypotéza
d80e10mero10	0.591	Potvrzena nulová hypotéza
d50hvo50	0.003	Zamítnuta nulová hypotéza
mero50hvo50	0.079	Potvrzena nulová hypotéza

Další možností, jak vyjádřit vliv použitého biopaliva na spotřebu je přepočítání zjištěných parametrů hodinové spotřeby paliva a hmotnostní výhřevnosti na energii obsaženou v palivu, která je dodána do spalovacího prostoru. Tyto výsledky jsou zobrazeny na obrázku 31.

Výsledky statistické analýzy párového t-testu jsou uvedeny v tabulce 19. Tyto výsledky jsou uvedeny, aby bylo možné porovnat i režimy, kdy nebyl z motoru odebírán točivý moment.



Obrázek 31 - Energetický příkon dodaný palivem, v závislosti na použitém biopalivu

Tabulka 19 - Výsledky statistického analýzy vlivu energetického příkonu paliva v jednotlivých bodech měření v závislosti na použitém biopalivu

Palivo	$p$	$H1_0$ : Použitá biopaliva nemají vliv na energetický příkon paliva
d90e10	0.403	Potvrzena nulová hypotéza
hvo100	0.739	Potvrzena nulová hypotéza
d90hvo05mero05	0.010	Zamítnuta nulová hypotéza
d80e10mero10	0.152	Potvrzena nulová hypotéza
d50hvo50	0.599	Potvrzena nulová hypotéza
mero50hvo50	0.957	Potvrzena nulová hypotéza

### **5.1.1 Dílčí závěry použití biopaliv na spotřebě paliva**

Z výsledků analýzy je patrné, že statisticky existují jen velmi malé rozdíly ve spotřebě testovaných paliv v porovnání s čistou motorovou naftou. Ve většině případů byla párovým t-testem potvrzena nulová hypotéza, tedy paliva nemají vliv na sledovaný parametr.

Jen jednou došlo k zamítnutí nulové hypotézy. Při provozu motoru na palivo **d90hvo05mero05** došlo k statisticky významné změně v energetickém příkonu paliva. Z grafu na obrázku 30 je patrné, že došlo ke snížení energetického příkonu paliva ve srovnání s čistou motorovou naftou. Vliv této směsi biopaliva lze hodnotit negativně, protože použité palivo zvyšuje spotřebu.

I přestože statistická analýza neprokázala další vlivy z výše uvedených grafů je patrné, že spalování čistého HVO nebo směsi s vysokým podílem HVO má za následek snížení celkové účinnosti motoru. Naopak paliva **d90hvo05mero05** a **d80e10mero20** měla při spalování za následek nepatrný nárůst celkové účinnosti motoru.

## 5.2 Produkce PM

Produkce PM byla hodnocena pomocí částicového klasifikátoru EEPS 3090, jehož popis je uveden v odstavci 4.2.3. Prezentované grafy na obrázcích 32 až 43 zobrazují průměrné koncentrace PM v řaděných výfukových plynech při ustálených režimech, v těchto grafech jsou pro lepší porovnání zobrazeny vedle sebe charakteristiky pro čistou motorovou naftu a zkoumaná paliva. Tak lze jednoduše porovnat průběhy produkce PM během měření. Získaná data jsou jednotlivá paliva a jednotlivé body, byla měřena pomocí EEPS 3090. V každém zkoumaném bodě pro každé palivo bylo získáno velikostní spektrum PM, které je tvořené 32 kanály. Každý z měřících kanálů reprezentuje PM určitého velikostního spektra a výsledkem měření je 32 hodnot, které reprezentují počet částic dané velikosti. Při grafickém zobrazení jsou tyto hodnoty pro lepší přehlednost spojeny do tvaru křivky.

Podobně jako při grafickém zobrazení zjištěných hodnot je u každého zkoumaného bodu uvedena tabulka s výsledky statistické analýzy. Souhrnné výsledky analýzy jsou uvedeny v tabulce 19. Statistická analýza byla prováděna vždy pro všech 32 hodnoty velikostí PM a tyto hodnoty byly vždy porovnávány s hodnotami zjištěnými při spalování čisté motorové nafty.

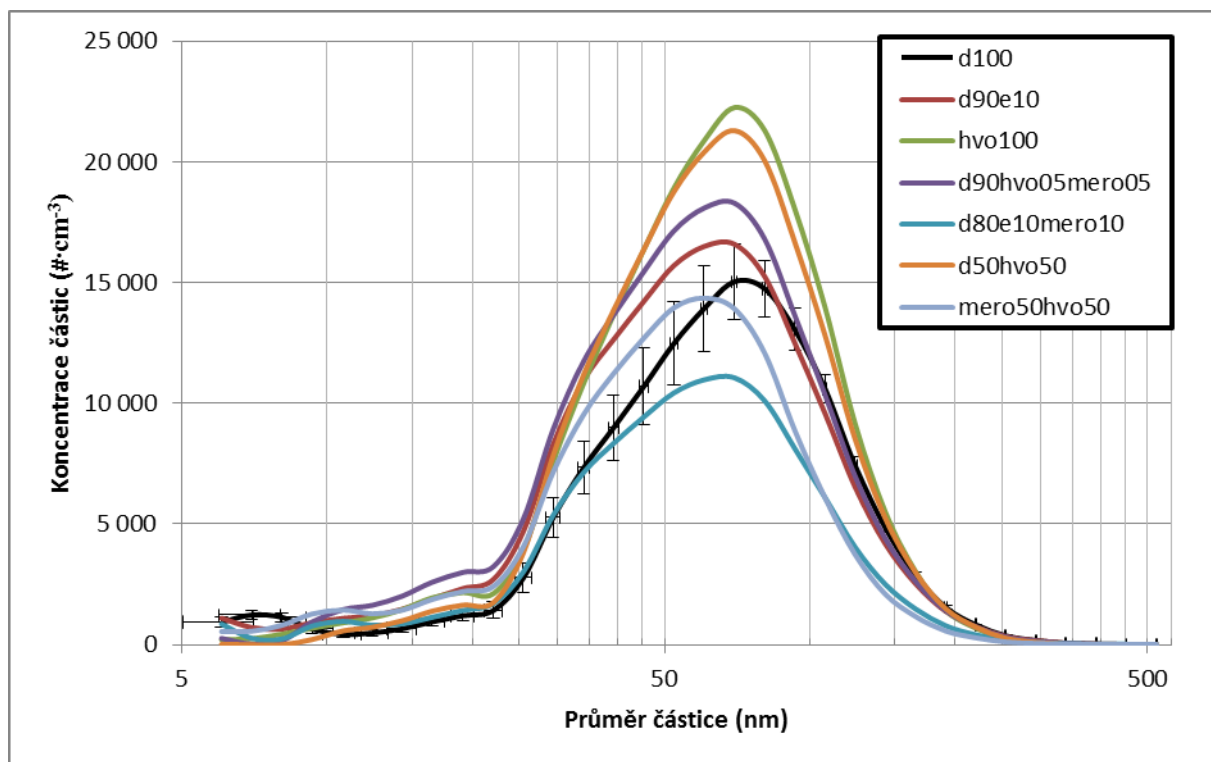
Hypotéza číslo 2 „Použitá biopaliva nemají podstatný vliv na produkci pevných částic a jejich velikostní“ si klade za cíl porovnat velikostní spektra a koncentrace PM s čistou motorovou naftou. V grafech a tabulkách je pro lepší srozumitelnost uváděn zjednodušený popis měřícího bodu, který se skládá ze dvou částí. První částí jsou otáčky, ve kterých byl motor během měření provozován, např: n 2200 znamená, že motor měl během měření otáčky ustálené přibližně na hodnotě  $2\,200 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Druhou část popisu je relativní zatížení motoru, které je označeno „rel.M“, a doplněné hodnotou zatížení v procentech z maximálního momentu a vychází z normy ISO 8178.

Tabulka 20 - Hodnocení hypotézy 2

	H <sub>2</sub> <sub>o</sub> (d90e10)	H <sub>2</sub> <sub>o</sub> (hvo100)	H <sub>2</sub> <sub>o</sub> (d90hvo05mero05)	H <sub>2</sub> <sub>o</sub> (d80e10mero10)	H <sub>2</sub> <sub>o</sub> (d50hvo50)	H <sub>2</sub> <sub>o</sub> (mero50hvo50)
n 2200 rel.M 100%	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA	POTVRZENA
n 2200 rel.M 75%	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA	POTVRZENA	POTVRZENA	ZAMÍTNUTA	POTVRZENA
n 2200 rel.M 50%	POTVRZENA	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA	POTVRZENA
n 2200 rel.M 25%	ZAMÍTNUTA	POTVRZENA	POTVRZENA	POTVRZENA	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA
n 2200 rel.M 10%	POTVRZENA	ZAMÍTNUTA	POTVRZENA	POTVRZENA	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA
n 1500 rel.M 100%	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA
n 1500 rel.M 75%	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA	POTVRZENA	POTVRZENA	ZAMÍTNUTA	POTVRZENA
n 1500 rel.M 50%	POTVRZENA	POTVRZENA	POTVRZENA	POTVRZENA	POTVRZENA	ZAMÍTNUTA
n 1500 rel.M 25%	POTVRZENA	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA	POTVRZENA	POTVRZENA	ZAMÍTNUTA
n 1500 rel.M 10%	ZAMÍTNUTA	POTVRZENA	POTVRZENA	ZAMÍTNUTA	POTVRZENA	POTVRZENA
volnoběh	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA	POTVRZENA	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA
zvýšený volnoběh	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA	ZAMÍTNUTA

### 5.2.1 Analýza PM v měřicím bodě 1

Režim prvního bodu měření odpovídá takovým parametrům nastavení motoru, kdy motor byl motor provozován v otáčkách maximálního výkonu a odebíraný moment byl maximální možný. Při tomto režimu byl motor provozován s použitím výše uvedených biopaliv. Zaznamenané koncentrace pevných částic jsou zobrazeny na obrázku 32. Výsledky statistické analýzy pro měřicí bod 1 jsou uvedeny v tabulce 21.



Obrázek 32 - Měřicí bod 1 - 2 200 ot./min – 100% zatížení

Tabulka 21 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřicí bod 1

Palivo	d90e10	hvo100	d90hvo05mero05	d80e10mero10	d50hvo50	mero50hvo50
<i>p</i>	0.0037	0.0004	0.0008	0.0011	0.0015	0.5390
Platnost H <sub>2</sub> <sub>0</sub>	NE	NE	NE	NE	NE	ANO

Na vodorovné ose grafu jsou v logaritmickém měřítku zobrazeny zjištěné rozměry pevných částic v nm. Svislá osa zobrazuje relativní koncentraci pevných částic ve zředěných výfukových plynech, tj. počet částic na cm<sup>3</sup> (označené # cm<sup>-3</sup>). Zkoumaná biopaliva jsou primárně porovnávána s čistou motorovou naftou. V grafech jsou koncentrace PM pro čistou motorovou naftu zobrazeny černou barvou, ostatní biopaliva jsou uvedena v legendě grafu. Totožné značení je použito i v následujícím textu v ostatních bodech měření.

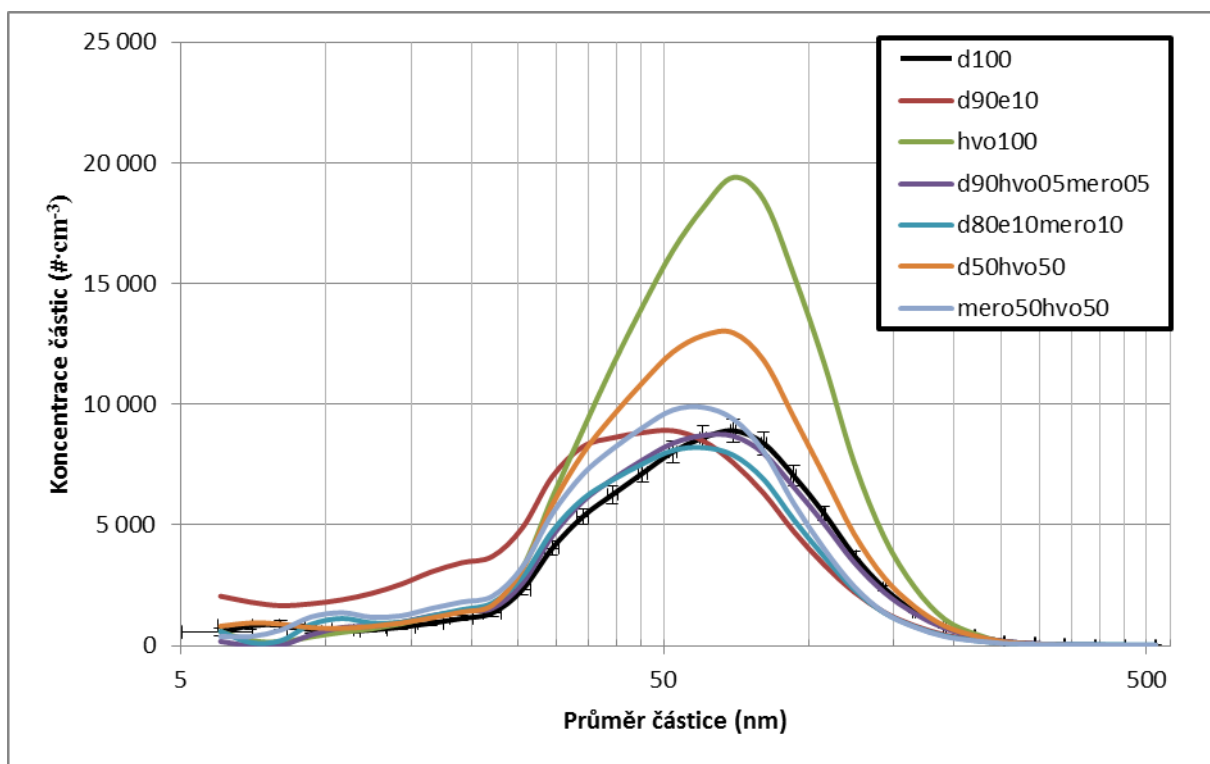
V tomto režimu pro většinu zkoumaných paliv došlo k nárůstu produkce PM. Pouze u paliv **d80e10mero10** a **mero50hvo50** byl zjištěn pokles produkce PM téměř v celém zkoumaném velikostním spektru. Z pohledu koncentrace PM nejhůře dopadlo čisté HVO, jehož produkce byla v tomto zkoumaném bodu vyšší až o 50%. V pořadí druhé nejhorší palivo bylo **d50hvo50**, jenž produkovalo podobné množství PM. Další podobnost paliv



hvo100 a d50hvo50 s motorovou naftou spočívá i v průběhu velikostního spektra produkovaných částic. Všechna ostatní paliva měla vrchol produkce PM posunutý směrem k menším rozměrům částic. Společným prvkem všech zkoumaných paliv je skutečnost, že nejvyšší produkce PM bylo dosaženo u částic, jejichž rozměr je v rozmezí 50 – 100 nm. Společným prvkem všech ověřovaných biopaliv je nižší produkce částic o rozměru přibližně 7 nm. V rozmezí 10 – 50 nm produkovala všechna biopaliva nepatrně víc PM než čistá motorová nafta. Od 200 nm je produkce PM při spalování všech paliv v podstatě shodná.

### 5.2.2 Analýza PM v měřicím bodě 2

Druhý zkoumaný bod měl parametry otáček motoru nastaveny na 2 200 ot. $\cdot$ min<sup>-1</sup> a zatížení motor bylo ustanoveno na 75% maximálního momentu. Výsledky produkce PM v závislosti na použitém palivu jsou uvedeny na obrázku 33. Výsledky statistické analýzy pro tento bod jsou uvedeny v tabulce 22.



Obrázek 33 - Měřicí bod 2 - 2 200 ot./min - 75% zatížení

Tabulka 22 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřicí bod 2

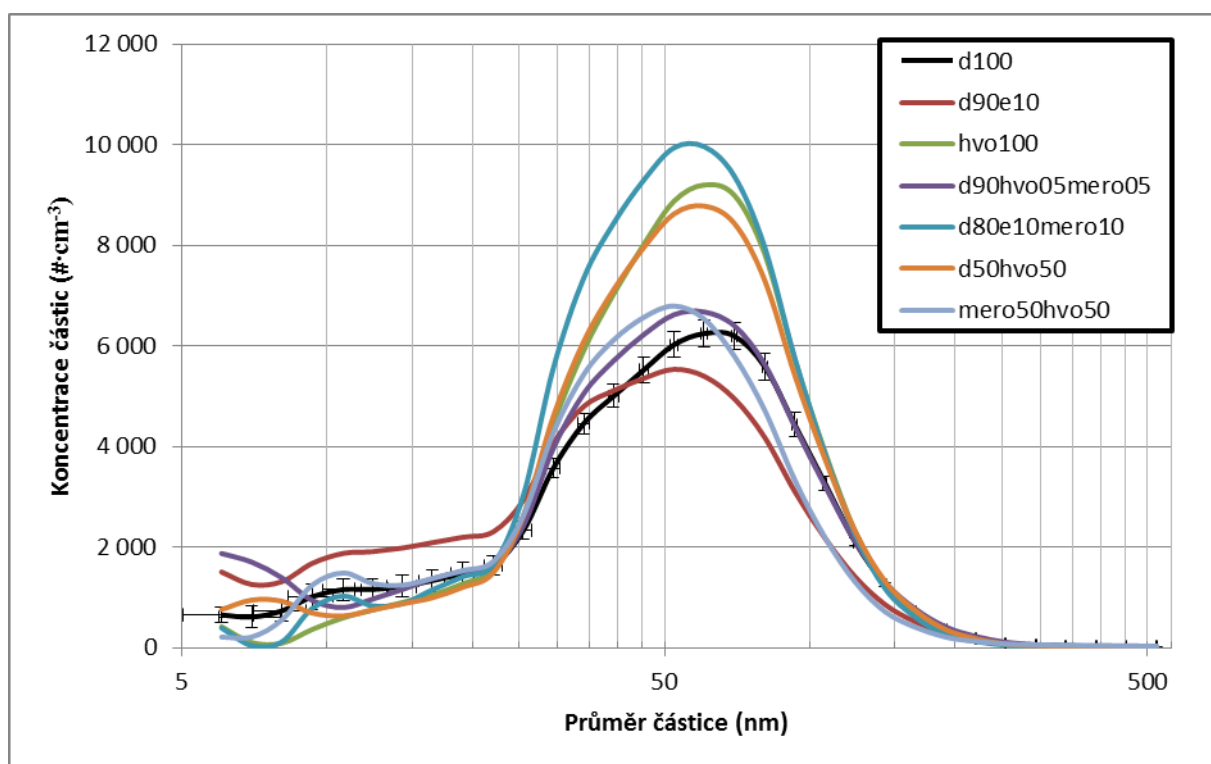
Palivo	d90e10	hvo100	d90hvo05mero05	d80e10mero10	d50hvo50	mero50hvo50
<i>p</i>	0.0499	0.0006	0.9962	0.1452	0.0002	0.1144
Platnost H <sub>2</sub> <sub>0</sub>	NE	NE	ANO	ANO	NE	ANO

Při tomto režimu se opět paliva obsahující vysoký podíl HVO projevila vyšší produkcí PM než čistá motorová nafta i než ostatní biopaliva. Stejně jako v bodě 1 mají paliva **hvo100** a **d50hvo50** vrchol produkce PM shodný s čistou motorovou naftou.

Ostatní biopaliva dosáhla velmi podobných výsledků, jako čistá motorová nafta. Z hlediska produkce PM jsou rozdíly velmi malé a i vrcholy jsou téměř shodné. Zásadním rozdílem oproti předchozímu bodu 1 došlo ke značnému posunu vrcholu produkce PM u paliva **d90e10** směrem k menším částicím. Dalším zásadním rozdílem je nárůst produkce PM při spalování paliva **d90e10** u částic od 34nm až po částice o rozměru jednotek nanometrů.

### 5.2.3 Analýza PM v měřicím bodě 3

Třetí měřicí bod představuje nastavení, při kterém byl motor provozován při 2 200 ot. $\cdot$ min<sup>-1</sup> a zatížený 50% z maximálního momentu. Výsledky produkce PM jsou zobrazeny na obrázku 34. Výsledky statistické analýzy pro měřicí bod 3 jsou uvedeny v tabulce 23.



Obrázek 34 - Měřicí bod 3 - 2 200 ot./min - 50% zatížení

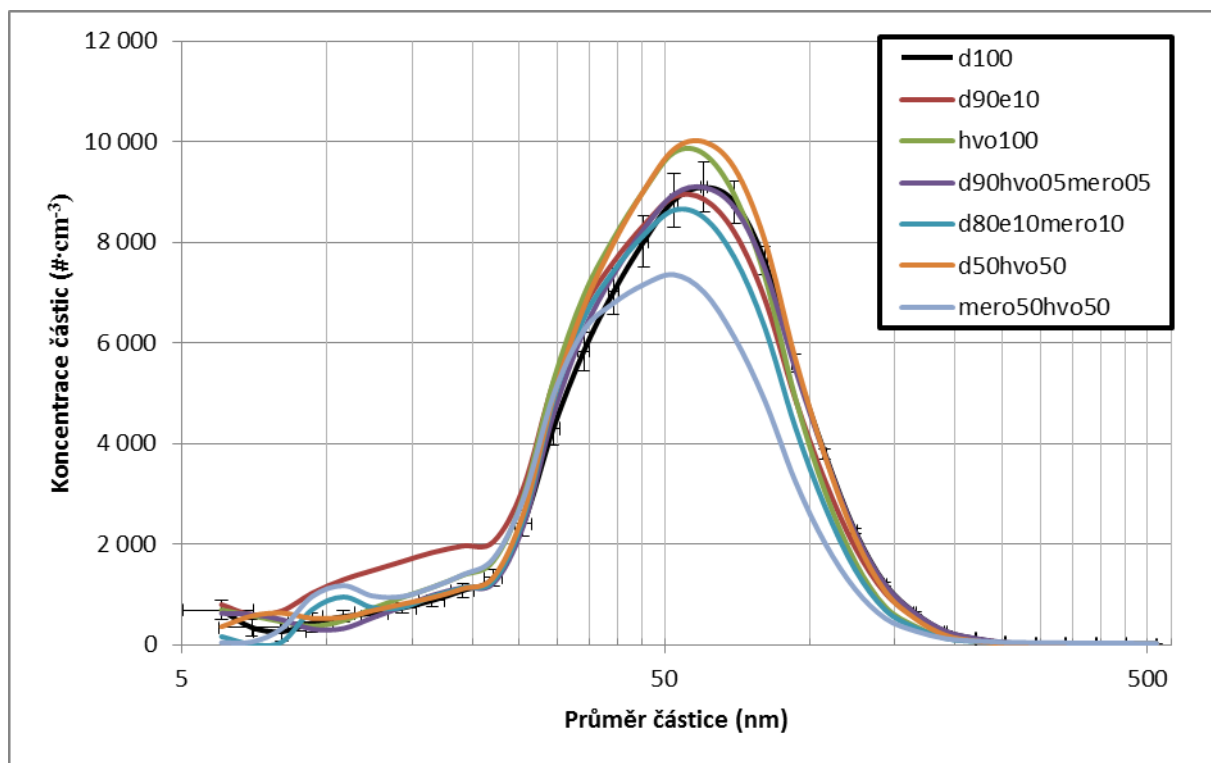
Tabulka 23 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřící bod 3

Palivo	d90e10	hvo100	d90hvo05mero05	d80e10mero10	d50hvo50	mero50hvo50
<i>p</i>	0.8637	0.0166	0.0050	0.0054	0.0048	0.9622
Platnost H <sub>2</sub> <sub>0</sub>	ANO	NE	NE	NE	NE	ANO

V tomto režimu dochází dále ke srovnávání rozdílů v produkci i velikostním spektru produkovaných částic. Opět jsou paliva obsahující vysoký podíl HVO vysoko nad produkcí PM při spalování čisté motorové nafty. Nejnižší produkce PM bylo zjištěno při provozování motoru na palivo **d90e10**. Spalováním tohoto paliva ve vznětovém motoru došlo ke snížení produkce PM v rozmezí 30 - 60 nm, zde byla produkce nižší než při provozu na motorovou naftu. Podobně jako v předchozím případě došlo celkově k posunu vrcholů produkce PM směrem k menším částicím. Ve srovnání s bodem 1 se v bodě 3 vrcholy produkce nachází v blízkosti rozměru 50 nm. Tvary velikostních spekter i maximální hodnoty produkce PM jsou v ostatních případech velice podobné spektru čisté motorové naftě.

### 5.2.4 Analýza PM v měřicím bodě 4

Předposledním zkoumaným bodem, při kterém byl motor provozován při 2 200 ot. $\cdot$ min<sup>-1</sup> a motor byl zatížen na 25 % byl bod číslo 4. Grafické zobrazení výsledků je uvedeno na obrázku 35. Výsledky statistické analýzy pro měřicí bod 4 jsou uvedeny v tabulce 24.



Obrázek 35 - Měřicí bod 4 - 2 200 ot./min - 25% zatížení

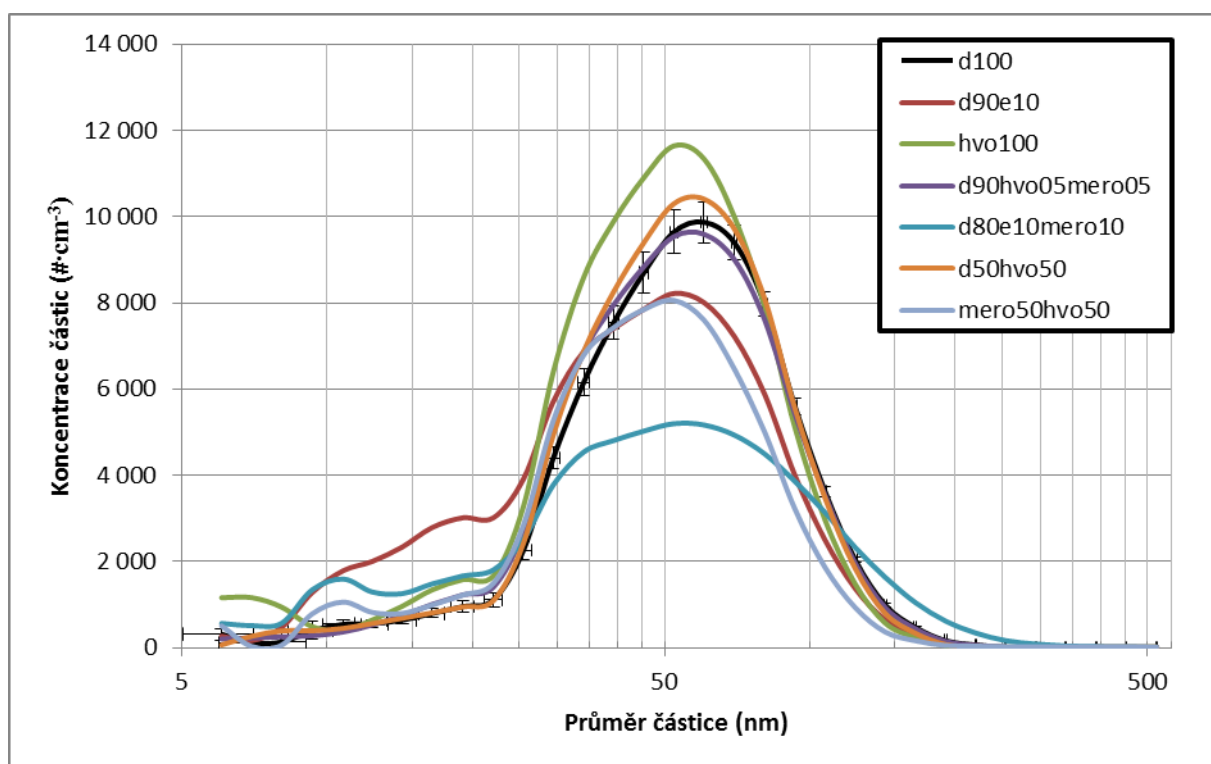
Tabulka 24 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřicí bod 4

Palivo	d90e10	hvo100	d90hvo05mero05	d80e10mero10	d50hvo50	mero50hvo50
<i>p</i>	0.0315	0.0937	0.2338	0.0532	0.0036	0.0246
Platnost H <sub>2</sub> <sub>0</sub>	NE	ANO	ANO	ANO	NE	NE

V tomto zkoumaném bodě dochází dále ke snižování rozdílů v jednotlivých velikostních spektrech i maximálních produkcích PM. Podobně jako v předchozích případech měly nejvyšší produkci PM paliva obsahující vysoký podíl HVO. Konkrétně se jednalo o paliva **hvo100** a **d50hvo50**. K zásadní změně došlo při spalování paliva **mero50hvo50**, kde došlo k prudkému poklesu produkce PM, produkce klesla až o 30% ve srovnání s ostatními palivy obsahující velký podíl HVO. Vrchol spektra se stabilně usadil na rozměru 50nm. I ostatní vrcholy se stále posouvají k nižším rozměrům.

### 5.2.5 Analýza PM v měřicím bodě 5

Měřicí bod 5 je posledním ze zkoumaných bodů, při kterém byly nastaveny otáčky motoru na  $2\,200\text{ ot.}\cdot\text{min}^{-1}$  a motor byl zatížen 10% maximálního momentu, kterým motor v daných otáčkách disponuje. Grafické zobrazení velikostních spekter je na obrázku 36. Výsledky statistické analýzy pro měřicí bod 5 jsou uvedeny v tabulce 25.



Obrázek 36 - Měřicí bod 5 - 2 200 ot./min - 10% zatížení

Tabulka 25 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřicí bod 5

Palivo	d90e10	hvo100	d90hvo05mero05	d80e10mero10	d50hvo50	mero50hvo50
<i>p</i>	0.6818	0.0027	0.3008	0.0714	0.0279	0.0399
Platnost $H_2O$	ANO	NE	ANO	ANO	NE	NE

Při takto nízkém zatížení došlo ke značnému zvětšení rozdílů mezi maximy produkcí pevných částic. Opět lze v získaných datech pozorovat podobné trendy jako v předchozích bodech. Znovu se jako nejhorší palivo z hlediska produkce PM jeví čisté HVO. Oproti předchozímu bodu bylo dosaženo nejnižší produkce PM při spalování paliva **d80e10mero10**. Rozdíl v produkcích je značný, čisté HVO produkovalo téměř 2,5x více PM než **d80e10mero10**.

Tvary jednotlivých spekter je téměř shodný s bodem 4. Jednotlivé vrcholy produkci PM jsou umístěny v těsné blízkosti rozměru 50nm nebo těsně nad touto hodnotou.

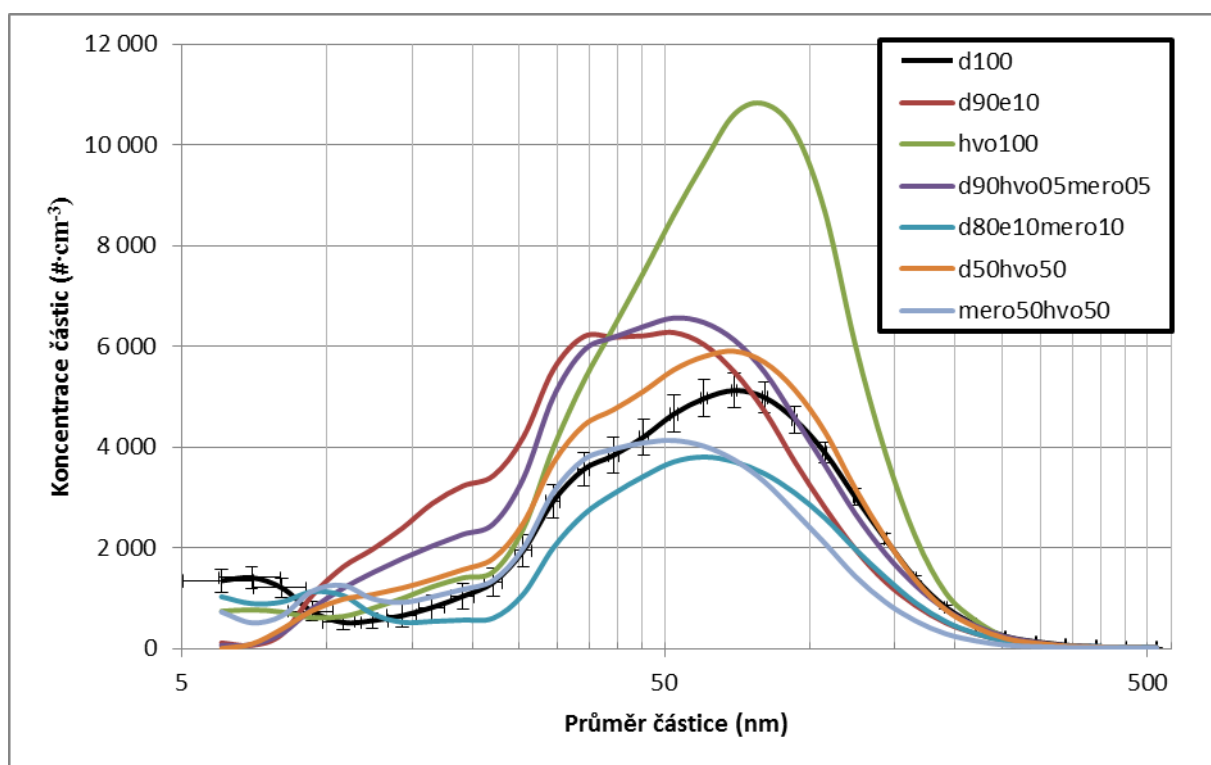
Palivo **d90e10** vykázalo zvětšení rozdílu produkce PM v rozmezí 10 – 30 nm ve srovnání s ostatními palivy a předchozími měřicími body. Při dalším srovnávání můžeme pozorovat značnou podobnost paliva **d90e10** s palivem **mero50hvo50**. Tvary spekter jsou od rozměru částice 30 nm téměř totožné.

#### **5.2.6 Dílčí závěry analýzy PM při režimech s otáčkami motoru 2 200 ot. $\cdot$ min<sup>-1</sup>.**

V první části experimentu byl motor provozován v oblasti otáček, při kterých je dosaženo nejvyššího výkonu. První měřicí bod je nastaven tak, aby došlo k maximálnímu zatížení motoru. S postupujícím měření jsou otáčky udržovány na konstantních 2 200 ot. $\cdot$ min<sup>-1</sup> a je postupně snižováno zatížení, až na hodnotu 10%. V předchozích pěti grafech jsou uvedeny výsledky měření velikostí a koncentrace PM. Obecně lze konstatovat, že v režimu vysokých otáček není vhodné provozovat motor na čisté HVO. Pravděpodobnou příčinou tohoto stavu je nižší hustota a výrazně vyšší cetanový index v porovnání s ostatními zkoumanými biopalivy i čistou motorovou naftou. Rychlost vznícení je vyšší, to má za následek že se méně paliva stihne odpařit a velikost kapek paliva (postupně se odpařujících) je v okamžik začátku hoření vyšší. To má pravděpodobně za následek zvýšení produkce PM. Z výsledků lze usoudit, že vysokoprocenní směsi HVO mají ve většině doposud zkoumaných bodů nepříznivý vliv na produkci PM v porovnání s čistou motorovou naftou. Palivo **d90e10** se v oblasti maximální produkce PM chová velmi podobně jako čistá motorová nafta, ale v oblasti nukleačního módu produkuje více částic než ostatní paliva. Jako pozitivní lze hodnotit výsledky paliv **mero50hvo50** a **d80e10mero10**. Při spalování těchto paliv docházelo často k výraznému poklesu produkce PM ve srovnání s čistou motorovou naftou. Ostatní paliva mají tvar velikostního spektra i maximální produkci PM velmi blízkou motorové naftě.

### 5.2.7 Analýza PM v měřicím bodě 6

Po režimech, při kterých byl motor provozován v otáčkách maximálního výkonu, byly zkoumány režimy při kterých je motor provozován v otáčkách, kde je dosaženo nejvyššího točivého momentu. Prvním takovým bodem je bod 6. Otáčky motoru byly nastaveny na 1 500 ot. $\cdot$ min<sup>-1</sup> a motor byl zatížen maximálním momentem. Výsledky tohoto měření jsou zobrazeny na obrázku 37. Grafická prezentace je shodná s předchozími měřicími body, tedy motorová nafta je v grafu zobrazena černou barvou a ostatní paliva dle legendy. Výsledky statistické analýzy pro měřicí bod 6 jsou uvedeny v tabulce 26.



Obrázek 37 - Měřicí bod 6 - 1 500 ot./min - 100% zatížení

Tabulka 26 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřicí bod 6

Palivo	d90e10	hvo100	d90hvo05mero05	d80e10mero10	d50hvo50	mero50hvo50
<i>p</i>	0.0256	0.0005	0.0053	0.0000	0.0233	0.0040
Platnost H <sub>2</sub> <sub>0</sub>	NE	NE	NE	NE	NE	NE

Při nižších otáčkách může z grafu vyčíst, že v tomto režimu mají použitá biopaliva vliv, jak na maximální hodnoty produkce PM, tak na pozici vrcholu produkce a celkový tvar velikostního spektra.

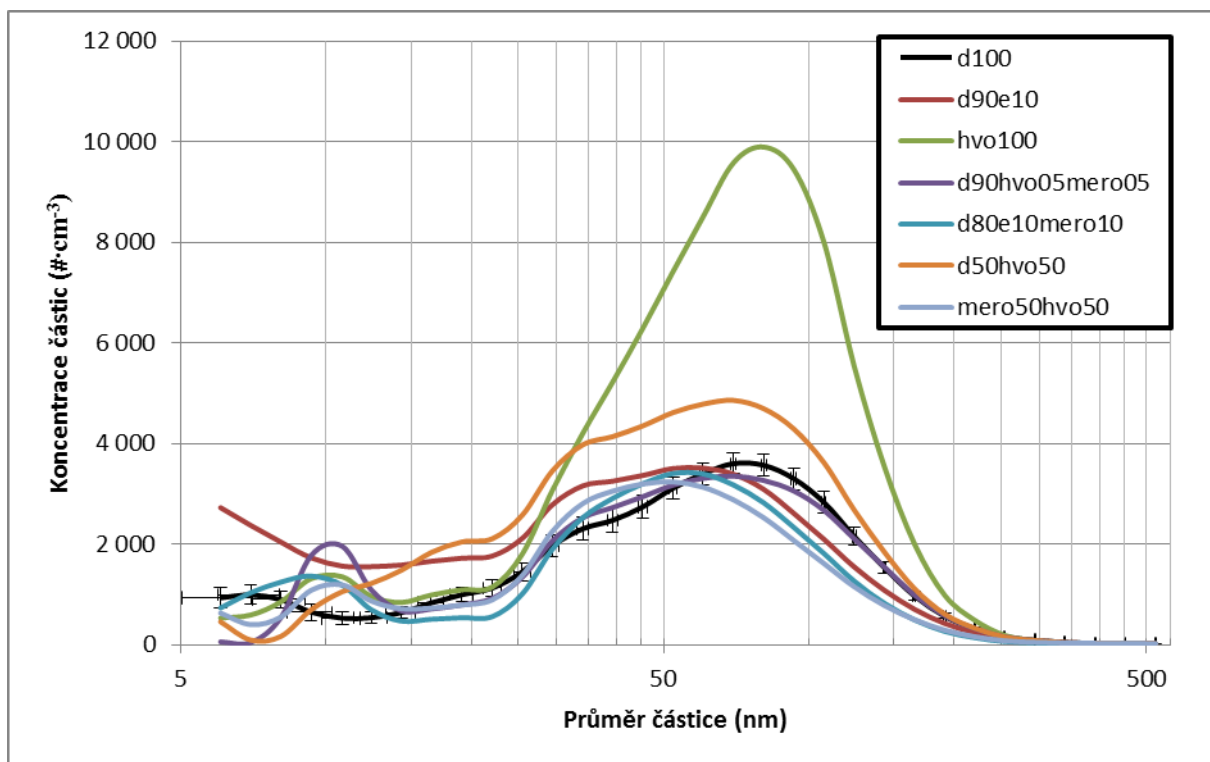
Palivo **hvo100** opět dosáhlo nejvyšší produkce PM ze všech zkoumaných paliv. Podobně jako v několika předchozích bodech bylo u paliva **d90e10** zjištěno, že produkuje nejvíce částic v nukleačním modu ze všech zkoumaných paliv. Nejvyšší produkce PM u **d90e10** bylo dosaženo v rozmezí 40 – 50 nm, podobně jako u paliva **d90hvo05mero05**.

Nejnižší produkce PM byla zaznamenána při spalování **d80e10mero10**, které produkovalo při hoření v motoru téměř 3x méně pevných částic než nejhorší palivo **hvo100**. Velmi podobného tvaru i maxima bylo dosaženo při spalování **mero50hvo50**, které se v tomto zkoumaném bodě mělo druhou nejnižší produkci PM. Poměrně zajímavého výsledku bylo dosaženo při použití paliva **d50hvo50**. V tomto případě je tvar velikostního spektra v podstatě shodný s velikostním spektrem pro čistou naftu, jen s tím rozdílem, že **d50hvo50** produkovalo celkově o necelých 20% více PM než čistá nafta.

#### **5.2.8 Analýza PM v měřícím bodě 7**

V pořadí 7. měřící bod měl provozní parametry motoru nastaveny tak, že otáčky byly zvoleny stejné, tedy  $1\ 500\ \text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$  a moment byl snížen na 75% z maximálního momentu. Grafická podoba výsledků je uvedena na obrázku 38. Výsledky statistické analýzy pro měřící bod 7 jsou uvedeny v tabulce 27.





Obrázek 38 - Měřící bod 7 - 1 500 ot./min - 75% zatížení

Tabulka 27 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřící bod 7

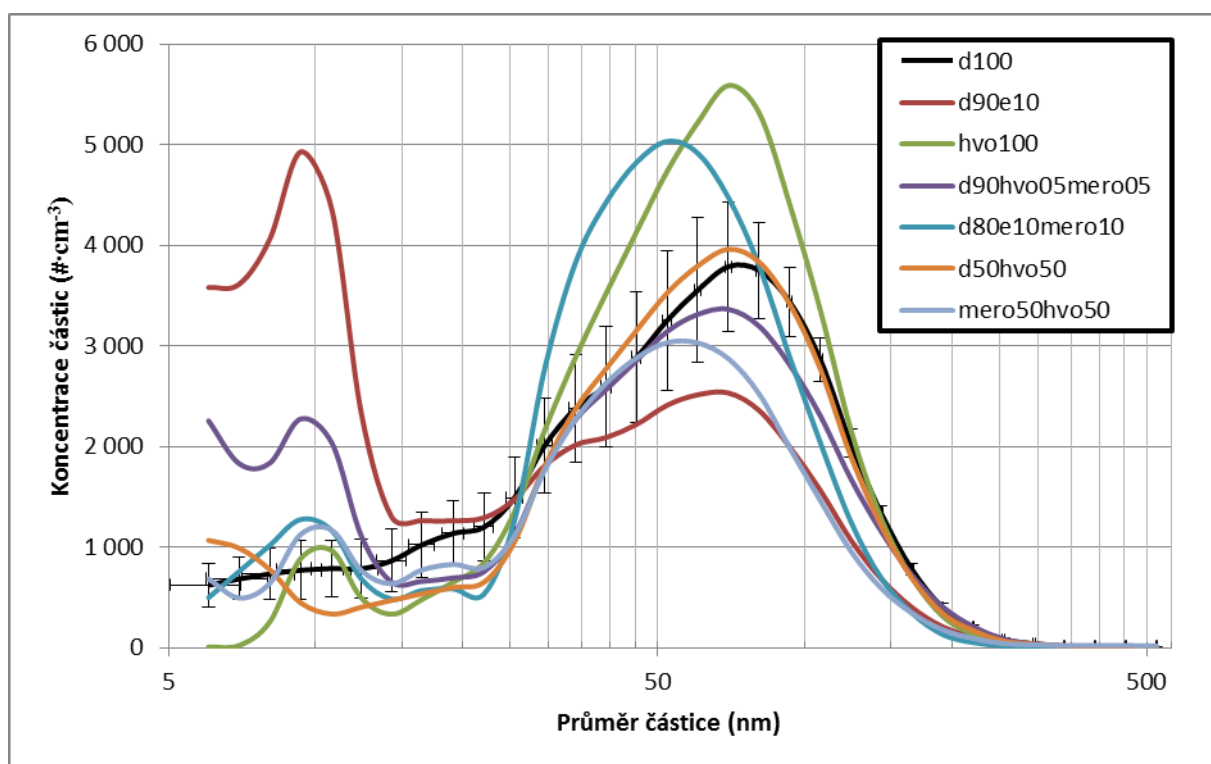
Palivo	d90e10	hvo100	d90hvo05mero05	d80e10mero10	d50hvo50	mero50hvo50
<i>p</i>	0.0055	0.0002	0.9616	0.0672	0.0001	0.0562
Platnost H <sub>2</sub> <sub>0</sub>	NE	NE	ANO	ANO	NE	ANO

Se snižujícím se zatížením lze pozorovat vznik určitých trendů a rozdílů, které se dále budou zvětšovat. V první řadě došlo k velmi prudkému nárůstu produkce nanočástic při spalování paliva **d90e10**. V předchozím měřícím bodě byla hodnota produkce PM u částic menších než 10 nm rovna téměř nule. Se snížením zatížení došlo ke skokovému nárůstu produkce těchto nukleačních částic. V podstatě lze prohlásit, že při spalování paliva **d90e10** motor začal produkovat vysoké množství pevných částic nukleačního modu.

V porovnání s maximální zaznamenanou hodnotou koncentrace PM se stále jedná o necelou třetinu. Maximální produkce PM bylo opět dosaženo při spalování čistého HVO. Produkce PM byla více než dvojnásobná ve srovnání s druhým nejhorším palivem **d50hvo50**. Při spalování ostatních paliv bylo dosaženo přibližně stejných koncentrací PM a i tvar velikostního spektra je velmi podobný hodnotám a tvaru spektra pro čistou motorovou naftu.

### 5.2.9 Analýza PM v měřicím bodě 8

V měřicím bodě 8 bylo opět sníženo zatížení motoru, tentokrát na hodnotu 50% z maximálního momentu. Otáčky motoru jsou stále udržovány na hodnotě 1 500 ot. $\cdot$ min<sup>-1</sup>. Výsledky měření jsou zobrazeny na obrázku 39. Výsledky statistické analýzy pro měřicí bod 8 jsou uvedeny v tabulce 28.



Obrázek 39 - Měřicí bod 8 - 1 500 ot./min - 50% zatížení

Tabulka 28 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřicí bod 8

Palivo	d90e10	hvo100	d90hvo05mero05	d80e10mero10	d50hvo50	mero50hvo50
<i>p</i>	0.3535	0.1003	0.6304	0.2764	0.1281	0.0008
Platnost H <sub>2</sub> <sub>0</sub>	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	NE

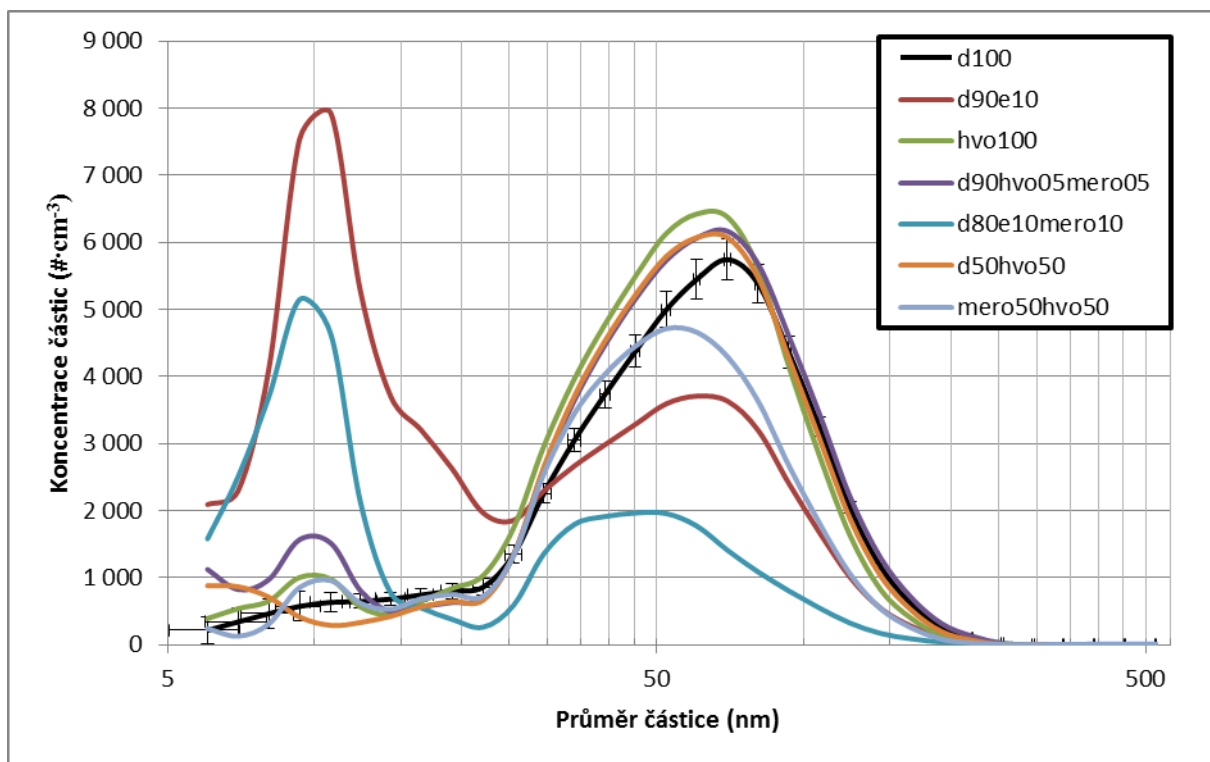
Zaznamenaná data v tomto měřicím bodě ukazují další změny hlavně v průběhu křivek velikostních spekter jednotlivých biopaliv. Stále se opakuje situace, kdy nejvyšší produkce PM bylo dosaženo spalováním čistého HVO a i tvar křivky velikostního spektra se u tohoto paliva nemění. Některá ostatní paliva začala produkovat výrazně více PM než tomu bylo doposud. Druhou nejvyšší produkci PM můžeme pozorovat při spalování **d80e10mero10**. Jen na rozdíl od **hvo100** má **d80e10mero10** vrchol produkce PM posunut přibližně o 25nm směrem k menším částicím.

Výraznější změny byly zaznamenány hlavně v oblasti nukleačních částic. Trend, který se u paliva **d90e10** poprvé objevil, u předchozího měřicího bodu pokračoval a došlo k dalšímu nárůstu produkce pevných částic. Tentokrát bylo vrcholu produkce PM pro palivo **d90e10** dosaženo u částic o rozměru přibližně 10nm. Tedy jednoznačně částice nukleačního modu. Maximální koncentrace PM je jen asi o 10% menší než u **hvo100** a v podstatě shodná s palivem **d80e10mero10**. Druhým palivem, které v tomto režimu začalo ve zvýšené míře produkovat částice nukleačního modu je **d90hvo05mero05**. Produkce nukleačních částic je sice poloviční než u **d90e10** a maximální hodnoty produkce je stále dosahováno u částic o rozměru cca 50nm, ale lze prohlásit, že dochází ke vzniku značného množství částic nukleačního modu.

Celkově lze z výsledků měření pro tento bod říci, že nejlepších výsledků bylo dosaženo při spalování paliva **mero50hvo50**. Toto palivo při spalování v podstatě nevytváří částice nukleačního modu. Maximální hodnoty produkce PM je dosaženo u částic o rozměru přibližně 50nm a maximální produkce téměř o čtvrtinu nižší ve srovnání s čistou motorovou naftou.

### 5.2.10 Analýza PM v měřícím bodě 9

Předposlední měřící bod s otáčkami motoru  $1\,500\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$  byl v pořadí devátým zkoumaným bodem. V tomto bodě měření byly stále udržovány konstantní otáčky motoru a zatížení motoru bylo sníženo na 25% hodnoty maximálního točivého momentu. Naměřené výsledky jsou uvedeny v obrázku 40. Výsledky statistické analýzy pro měřící bod 9 jsou uvedeny v tabulce 29.



Obrázek 40 - Měřící bod 9 - 1 500 ot./min - 25% zatížení

Tabulka 29 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřící bod 9

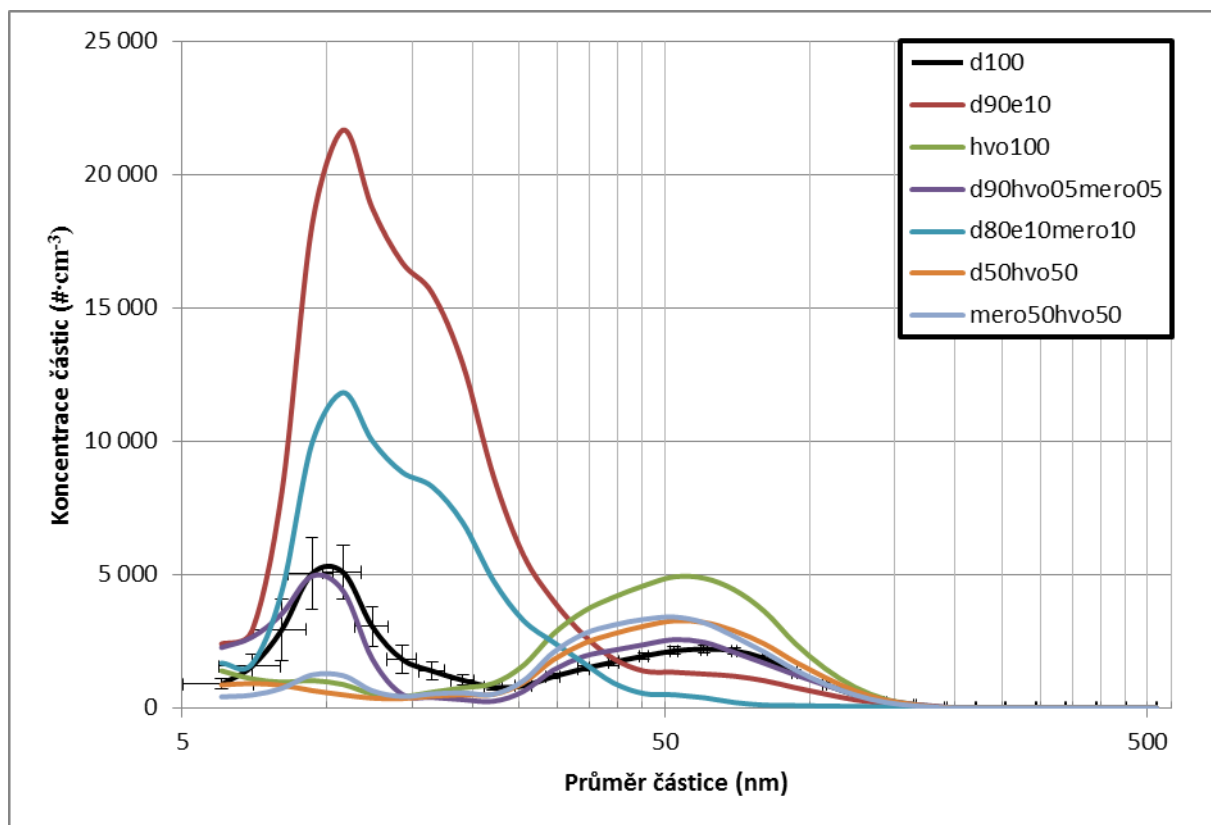
Palivo	d90e10	hvo100	d90hvo05mero05	d80e10mero10	d50hvo50	mero50hvo50
<i>p</i>	0.1478	0.0153	0.0001	0.1846	0.0814	0.0133
Platnost $H_2O$	ANO	NE	NE	ANO	ANO	NE

V tomto měřícím bodě je poprvé dosaženo maximální produkce PM jiným palivem než čistým HVO. Nejvyšší hodnoty bylo dosaženo při spalování paliva **d90e10**. Oproti předchozímu bodu došlo k nárůstu produkce částic nukleačního modu u **d90e10** o 60%. Poprvé za celý experiment je nejvyšší hodnoty produkce PM dosaženo u částic o rozměru cca 10 nm, jedná se tedy o částice nukleačního modu. Druhým palivem, u kterého byl zaznamenán prudký nárůst produkce částic nukleačního modu, je palivo **d80e10mero10**. Současně došlo u toho paliva k prudkému poklesu produkce PM o rozměrech kolem 50nm. Produkce těchto částic je ve srovnání s čistou motorovou naftou na téměř třetinových hodnotách.

Zřejmě nejlepšího výsledku bylo v tomto měřícím bodě dosaženo při použití paliva **mero50hvo50**. Při takto nastavených provozních parametrech motoru téměř nedochází k produkci částic nukleačního modu a produkce částic o rozměru přibližně 50nm je jedna z nejnižších. Ostatní paliva dosahují podobných hodnot maximální produkce PM jako čistá motorová nafta, včetně tvaru velikostního spektra.

#### **5.2.11 Analýza PM v měřícím bodě 10**

Poslední měřící bod, při kterém docházelo k vnějšimu zatěžování motoru, byl bod číslo 10. Stejně jako v předchozích čtyřech měřících bodech, byly otáčky motoru stále udržovány na hodnotě  $1\,500\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$  a zatížení motoru bylo sníženo na hodnotu 10% z maximálního momentu. Na obrázku 41 jsou graficky zobrazeny naměřené hodnoty koncentrací PM pro různá paliva. Výsledky statistické analýzy pro měřící bod 10 jsou uvedeny v tabulce 30.



Obrázek 41 - Měřící bod 10 - 1 500 ot./min - 10% zatížení

Tabulka 30 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřící bod 10

Palivo	d90e10	hvo100	d90hvo05mero05	d80e10mero10	d50hvo50	mero50hvo50
<i>p</i>	0.0028	0.5262	0.8443	0.0302	0.2395	0.2510
Platnost H <sub>2</sub> <sub>o</sub>	NE	ANO	ANO	NE	ANO	ANO

Při měření posledního bodu, při kterém byl motor provozován při otáčkách 1 500 ot. $\cdot$ min<sup>-1</sup> došlo k dalšímu nárůstu produkce PM nukleačního modu u paliv obsahující bioethanol. Maximální hodnota byla zjištěna při spalování **d90e10** a je téměř shodná s doposud nejvyšší zaznamenanou hodnotou s tím rozdílem, že rozměr částice byl 10nm. Poloviční produkce PM bylo dosaženo palivem **d80e10mero10**. Zjištěné velikostní spektru má velmi podobný tvar jako velikostní spektrum paliva **d90e10**. Palivo **d90hvo05mero05** dosáhlo dvounásobné produkce nanočástic oproti předchozím stavům. Ještě nepatrně vyšších hodnot tvorby nanočástic bylo dosaženo při spalování čisté motorové nafty.

Produkce částic nukleačního modu ostatních paliv byla ve srovnání s výše zmíněnými zanedbatelná, ovšem dosahovala vyšší produkce PM o rozměru přibližně 50nm. Částice o tomto rozměru byly nejvíce produkovány při spalování čistého HVO.

Opět bylo změřeno, že spalování **mero50hvo50** má stabilně nízkou produkci částic ve všech zkoumaných rozměrech PM.

#### **5.2.12 Dílčí závěry analýzy PM při režimech s otáčkami motoru 1 500 ot. $\cdot$ min<sup>-1</sup>.**

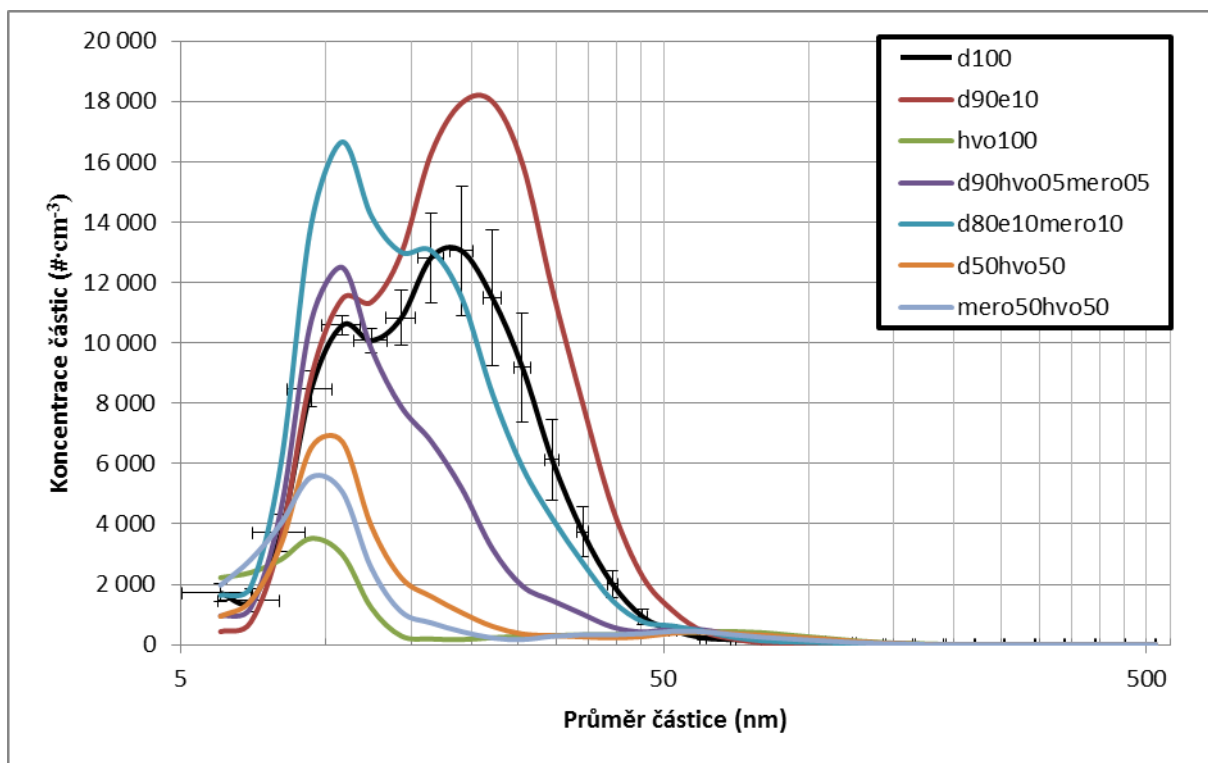
V této části experimentu byl motor provozován v oblasti otáček, při kterých je dosažen nejvyšší moment. První měřicí bod je nastaven tak, aby došlo k maximálnímu zatížení motoru. S postupujícím měření jsou otáčky udržovány na konstantních 1 500 ot. $\cdot$ min<sup>-1</sup> a je postupně snižováno zatížení, až na hodnotu 10%.

Během těchto měřících bodů nelze jednoznačně prohlásit, že paliva obsahující vysoký podíl HVO dosáhla horších výsledků. Provedená měření prokázala, že snižující se zatížení motoru přispívá u paliv s obsahem bioethanolu ke vzniku částic nukleačního modu. Již druhý měřicí bod přinesl prudký nárůst produkce PM u paliva **d90e10**. S postupným snižováním zatížení motoru se tento jev stává evidentně dominantním. Motor začal při spalování paliv s obsahem bioethanolu produkovat velké množství nanočástic, které je počtem částic srovnatelné s prvními dvěma měřícími body.

V průběhu měření se prokázalo, že palivo **mero50hvo50** stabilně dosahuje nízkých hodnot produkce PM v podstatě ve všech zatím zkoumaných režimech. Částice nukleačního modu vznikají při spalování toho paliva jen ve velmi malém množství. Pravděpodobnou příčinou je kombinace palivářských vlastností jednotlivých paliv, které při 50% koncentraci v palivu mají vhodnější vlastnosti než čistá motorová nafta. Dalším výzkumem lze určit, jestli koncentrace jednotlivých složek paliva jsou vhodné, nebo je zde prostor pro další optimalizaci.

### 5.2.13 Analýza PM v měřicím bodě 11

Prvním bodem, zkoumaným bez vnějšího zatížení, byl režim volnoběžných otáček motoru. Výsledky této části experimentu jsou na obrázku 42. Výsledky statistické analýzy pro měřicí bod 12 jsou uvedeny v tabulce 31.



Obrázek 42 - Měřicí bod 11 - volnoběžné otáčky - 0% zatížení

Tabulka 31 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřicí bod 11

Palivo	d90e10	hvo100	d90hvo05mero05	d80e10mero10	d50hvo50	mero50hvo50
<i>p</i>	0.0036	0.0016	0.0210	0.3967	0.0017	0.0023
Platnost H <sub>2</sub> O	NE	NE	NE	ANO	NE	NE

V tomto režimu provozu motoru došlo k posunu vrcholů produkce PM u všech biopaliv pod hodnotu 50nm. Většina paliv, až na čistou motorovou naftu a **d90e10**, měla maximální produkci PM u částic o rozměru cca 10nm.

Nejvyšší hodnoty koncentrace PM bylo dosaženo opět při spalování **d90e10**. Za pozitivní fakt lze považovat to, že vrchol produkce PM pro palivo **d90e10** je nejvíce posunut směrem k velkým částicím. Druhých nejvyšších hodnot koncentrace PM bylo dosaženo spalováním

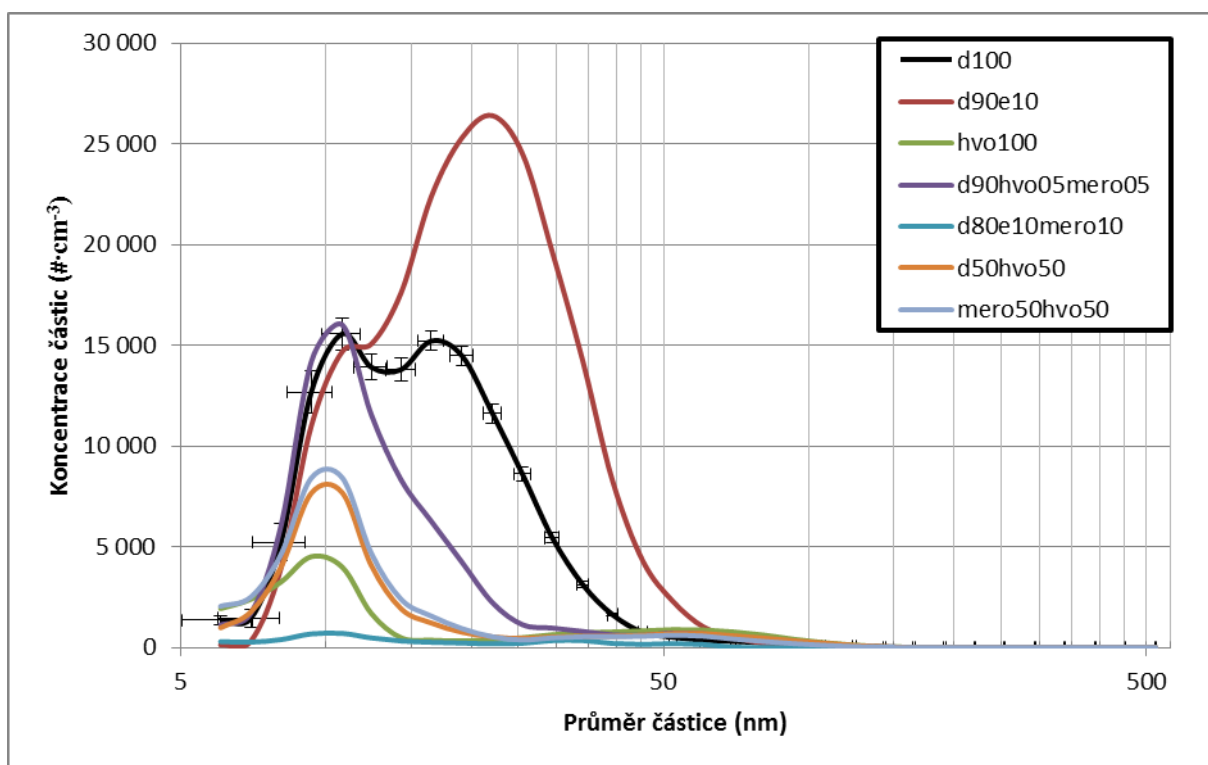


**d80e10mero10**, ale oproti **d90e10** je vrchol koncentrace PM posunut o 10nm směrem k menším rozměrům částic.

Na druhé straně jsou nejnižší hodnoty koncentrace PM detekovány u paliv s vysokým obsahem HVO. Konkrétně nejnižší hodnota byla naměřena pro čisté HVO. Druhá nejnižší hodnota byla zjištěna při spalování paliva **mero50hvo50**.

#### 5.2.14 Analýza PM v měřicím bodě 12

Posledním ze zkoumaných bodů je bod, který byl nově navržen a definován autorem této práce, který však v současnosti není stanoven v žádném z běžně používaných homologačních cyklů. Měřicí bod 12 byl nazván „zvýšený volnoběh“. Při tomto bodu jsou otáčky motoru nastaveny na hodnotu 1 200 ot. $\cdot$ min<sup>-1</sup> a motor není zatížen vnějším momentem. Produkce PM jsou zobrazeny na obrázku 43 a výsledky statistické analýzy pro měřicí bod 12 jsou uvedeny v tabulce 32.



Obrázek 43 - Měřicí bod 12 - 1 200 ot./min - 0% zatížení

Tabulka 32 - Výsledky statistické analýzy produkce PM pro měřicí bod 12

Palivo	d90e10	hvo100	d90hvo05mero05	d80e10mero10	d50hvo50	mero50hvo50
<i>p</i>	0.0063	0.0022	0.0130	0.0006	0.0018	0.0024
Platnost H <sub>2</sub> O	NE	NE	NE	NE	NE	NE

Oproti popisu předchozích měřících bodů zde bude postupováno opačně, tedy o nejnižší koncentrace PM po nejvyšší. Nejnižší hodnoty bylo dosaženo při spalování paliva **d80e10mero10**. Koncentrace PM je v tomto případě téměř nulová. Druhé nejnižší koncentrace bylo dosaženo spalováním **hvo100**. A jen o trochu hůř dopadla další paliva obsahující vysoký podíl HVO.

Nejvyšší produkce částic nukleárního modu bylo dosaženo spalováním **d90hvo05mero05** a jen nepatrně menší hodnoty dosáhla čistá motorová nafta. Obě zmíněná paliva mají vrchol koncentrace PM u částic o rozměru přibližně 10 nm.

Spalování čisté motorové nafty mělo za následek vytvoření druhého přibližně stejně vysokého vrcholu u částic o rozměru cca 17 nm.

Jednoznačně nejhoršího výsledku za celou dobu experimentu bylo dosaženo při měření 12 bodu s palivem **d90e10**. I přestože motor nebyl zatížen, byla maximální koncentrace o 20% větší PM než byla doposud nejvyšší naměřená hodnota. Palivo **d90e10** dosáhlo maximální koncentrace PM u částic o rozměru přibližně 22 nm.

#### **5.2.15 Dílčí závěry analýzy PM**

Velký podíl HVO v palivu má pozitivní vliv na produkci PM během režimů nízkých otáček a zatížení (tj. volnoběh a zvýšený volnoběh). Měření prokazují signifikantní vliv HVO na produkci částic nukleárního módu. Zkoumaná paliva **mero50hvo50**, **d50hvo50** a čisté **hvo100** měla vždy nižší produkci PM ve srovnání s naftou při režimech nízkých otáček motoru. Palivo **d90hvo05mero05** v režimech nízkých otáček motoru vykazuje podobné spektrum produkovaných částic jako motorová nafta.

HVO ve směsném palivu má naopak nepříznivý vliv na produkci částic akumulárního modu a to v režimech vysokého zatížení motoru. To potvrzují výsledky z měření při použití paliv **d50hvo50**, **d90hvo05mero05** a **hvo100**.

Pozitivní vliv na produkci PM při režimech vysokého zatížení má použití MEŘO jako příměsi do paliva. Při použití paliva **d80e10mero10** a **mero50hvo50** došlo k poklesu koncentrace PM akumulárního modu.

Paliva obsahující malý podíl bioethanolu vytvářejí při spalování ve vznětovém motoru velké množství PM při režimech nízkých otáček a velmi malých zatížení. Nejvyšších

naměřených hodnoty koncentrace PM bylo dosaženo při režimu zvýšeného volnoběhu, kdy maximální naměřená hodnota byla o 20% vyšší než v pořadí druhá nejvyšší.

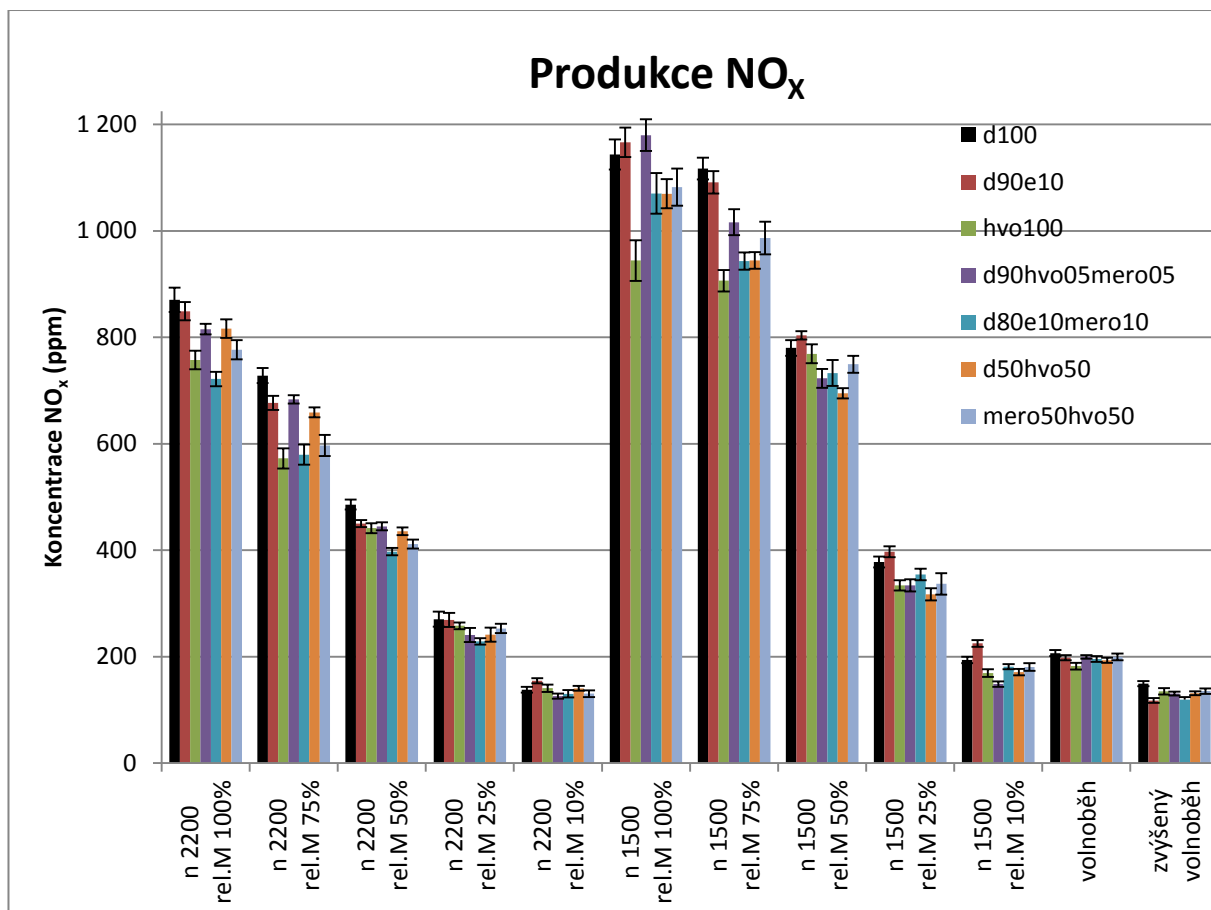
Z těchto závěrů lze určit směsné biopalivo **mero50hvo50** jako nejvhodnější ze zkoumaných paliv pro spalování ve vznětovém motoru z pohledu koncentrace PM. 50% podíl MEŘO snižuje produkci PM při režimech vysokého a částečného zatížení. 50% podíl HVO pomáhá snížit produkci PM při volnoběžných otáčkách a v režimech nízkého zatížení.

Z výsledků měření nelze jednoznačně prokázat pozitivní vliv bioethanolu ve směsném palivu. Proto by bylo vhodné s výzkumem dále pokračovat a otestovat další paliva založená na stejném podílu směsi MEŘO a HVO s přídavkem nízkého procenta bioethanolu.

Takto navržené palivo by mohlo být kandidátem pro využití ve vznětových spalovacích motorech pro pracovní stroje. Toto palivo lze 100% vyrobit z obnovitelných zdrojů. Dále by bylo možné optimalizovat nastavení vznětového motoru pro ještě dokonalejší spálení paliva s cílem snížit produkci škodlivých složek.

### 5.3 Produkce NO<sub>x</sub>

Z rešerše vyplývá, že problematika produkce emisí NO<sub>x</sub> vznětovými motory je velice aktuální téma. Proto se tato práce zkoumáním použitým biopalivem a produkcí emisí NO<sub>x</sub> také zabývá.



Obrázek 44 - Vliv biopaliv na produkci NO<sub>x</sub>

Výsledky měření produkce emisí NO<sub>x</sub> jsou vyobrazeny na obrázku 44. Výsledky statistické analýzy jsou uvedeny v tabulce 33. Při spalování biopaliv bylo dosaženo průměrného poklesu produkce emisí NO<sub>x</sub> v rozmezí 1 – 12 %.

Tabulka 33 - Výsledky statistické analýzy vlivu biopaliv na emise NO<sub>x</sub>

Palivo	p	H <sub>30</sub> : Použitá biopaliva nemají vliv na spotřebu vznětového motoru
<b>d90e10</b>	0.529	Potvrzena nulová hypotéza
<b>hvo100</b>	0.008	Zamítnuta nulová hypotéza
<b>d90hvo05mero05</b>	0.004	Zamítnuta nulová hypotéza
<b>d80e10mero10</b>	0.002	Zamítnuta nulová hypotéza
<b>d50hvo50</b>	0.001	Zamítnuta nulová hypotéza
<b>mero50hvo50</b>	0.002	Zamítnuta nulová hypotéza

Produkce emisí NO<sub>x</sub> je srovnávána primárně s čistou motorovou naftou. Při spalování čistého **hvo100** bylo průměrně dosaženo poklesu produkce NO<sub>x</sub> o 11 %, spalováním **d80e10mero10** bylo průměrně dosaženo poklesu 12 %. U zbylých paliv bylo dosaženo shodného poklesu produkce NO<sub>x</sub> v průměru o 9 %. Spalování všech zkoumaných biopaliv, kromě **d90e10**, mělo pozitivní přínos na produkci emisí NO<sub>x</sub>. Z výsledků statistické analýzy vyplývá, že je částečně potvrzena hypotéza číslo 3.

Při podrobnějším zkoumání naměřených hodnot lze konstatovat, že použití paliva **d90e10** nemusí být z hlediska produkce emisí NO<sub>x</sub> vhodné. Spalování tohoto paliva v pěti z dvanácti zkoumaných bodů mělo za následek nárůst produkce NO<sub>x</sub>. V případě že byl motor provozován při jmenovitých otáčkách a 10% zatížení, došlo k nárůstu produkce NO<sub>x</sub> o 16 % ve srovnání s čistou motorovou naftou.

Provozování motoru na palivo **hvo100** mělo negativní vliv jen v režimu maximálních otáček a nejnižšího zatížení motoru, kdy došlo k 2% nárůstu produkce NO<sub>x</sub>. V ostatních režimech došlo k poklesu. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při režimech se jmenovitými otáčkami motoru, kde je přínos jednoznačný. Porovnáním paliva **hvo100** s čistou motorovou naftou bylo dosaženo druhého největšího poklesu produkce emisí NO<sub>x</sub>.

Spalování paliva **d90hvo05mero05** mělo za následek zvýšení produkce emisí NO<sub>x</sub> v režimu jmenovitých otáček a maximálního zatížení. Průměrně ale došlo ke snížení produkce o 9 %, zejména při jmenovitých otáčkách.

Provozování motoru na palivo **d80e10mero10** mělo ve všech bodech pozitivní vliv na produkci emisí NO<sub>x</sub>. Lepších výsledků bylo dosaženo při režimech maximálních otáček, kde je produkce NO<sub>x</sub> nižší až o 15 % ve srovnání s naftou.

Směsné biopalivo **d50hvo50**, při spalování v motoru, mělo za následek průměrné snížení produkce emisí NO<sub>x</sub> o 9 %. Podobně jako při spalování čistého **hvo100** bylo dosaženo lepších výsledků při provozování motoru v režimech jmenovitých otáček. V těchto režimech bylo dosaženo poklesu produkce emisí NO<sub>x</sub> přibližně o 12 %.

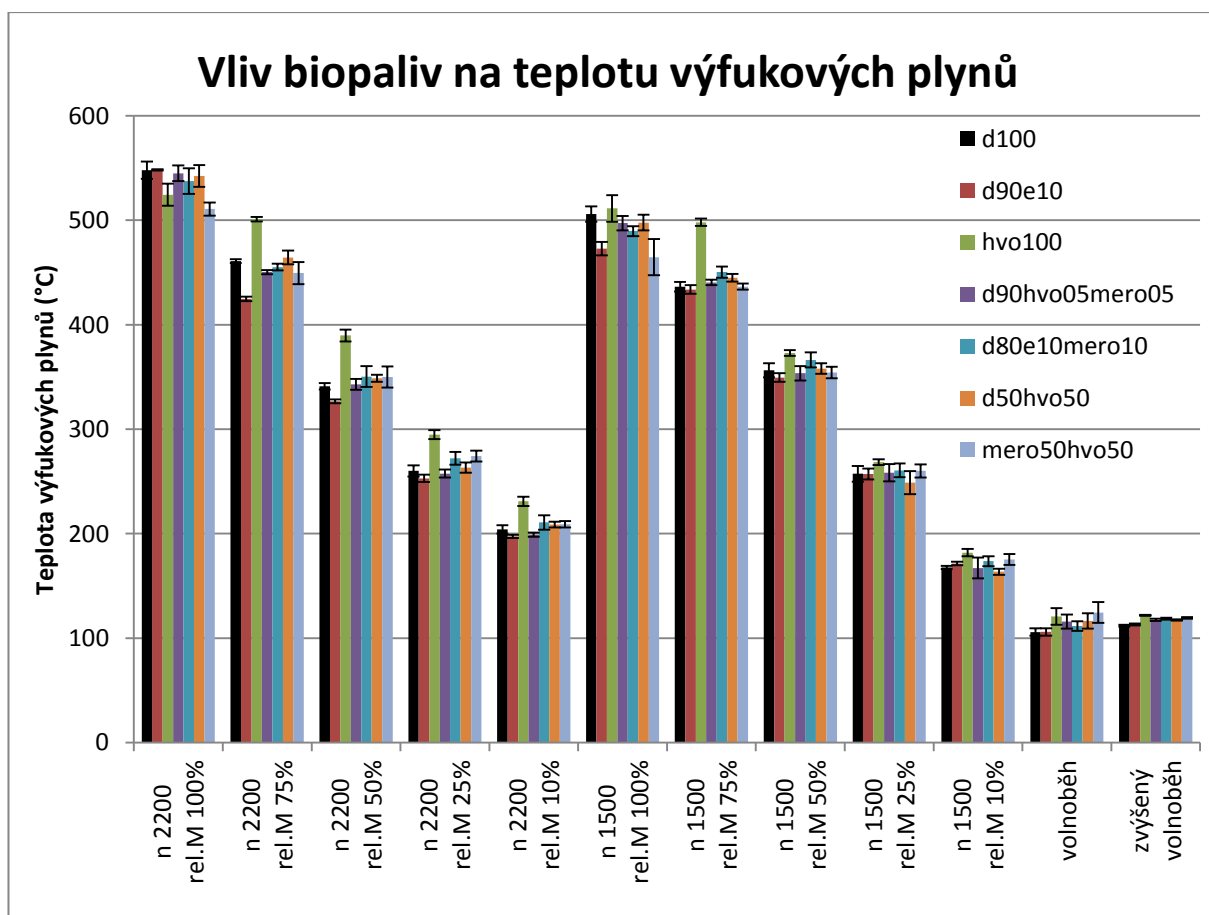
Provozování motoru na palivo **mero50hvo50** mělo pozitivní vliv na emise NO<sub>x</sub> ve všech zkoumaných bodech měření. Výraznější vliv byl pozorován v měřicích bodech, kde byl motor provozován na maximální otáčky. V těchto režimech bylo dosaženo druhého největšího poklesu a to o 11 % ve srovnání s čistou motorovou naftou. Lepšího výsledku bylo dosaženo jen při spalování směsného biopaliva **d80e10mero10**, kde byl výsledek ještě o 4 % lepší. Při režimech, kdy byl motor provozován na jmenovité otáčky, bylo opět dosaženo podobného výsledku jako při spalování **d80e10mero10**. Pokles produkce emisí NO<sub>x</sub> byl v těchto režimech 8 %.

Provozování motoru v režimu volnoběžných otáček a zvýšeného volnoběhu přineslo ve všech zkoumaných případech pozitivní přínos na produkci emisí NO<sub>x</sub>. Tento pokles byl v rozmezí 3 – 21 %. Nejvyšší pokles byl zaznamenán při spalování směsného biopaliva **d90e10**, kde bylo při režimu zvýšeného volnoběhu dosaženo nejvyššího poklesu 21 %. Na druhé straně zjištěných hodnot jsou shodně paliva **d90hvo05mero05** a **mero50hvo50**, kdy při režimech volnoběžných otáček bylo dosaženo poklesu emisí NO<sub>x</sub> jen o 3 %. Průměrně bylo dosaženo nejnižší produkce emisí NO<sub>x</sub> při volnoběžných režimech spalováním paliv **d90e10** a **d80e10mero10**.

### 5.3.1 Teplota výfukových plynů

Jednou z měřených veličin, která má přímý vliv složení emisí je teplotní historie výfukových plynů. Při experimentu bylo umístěno teplotní čidlo do místa těsně za poslední koleno svodů výfukových plynů. Zjištěná teplota je spíše průměrná a v místě, kde byla měřena by neměla mít zásadní vliv na tvorbu dusíkatých emisí.

Zjištěné hodnoty nejsou zkoumány v rámci cílů disertační práce, ale existuje předpoklad, že teplota výfukových plynů byla použitím biopaliv změněna a její případná změna by mohla být dále zkoumána. Teplota výfukových plynů během jednotlivých bodů měření je graficky znázorněna na obrázku 45.



Obrázek 45 - Vliv biopaliv na teplotu výfukových plynů

Z grafu na obrázku 45 je patrné, že existuje zásadní rozpor mezi naměřenou teplotou a produkcí  $\text{NO}_x$ .

Ve většině zkoumaných bodech byla naměřená teplota nejvyšší u paliva **hvo100**, což je v přímém rozporu s výsledky FTIR analýzy pro  $\text{NO}_x$ . Na obrázku 45 je jasně patrné, že

nejnižší produkce  $\text{NO}_x$  bylo dosaženo právě při spalování paliva **hvo100**. Tento zásadní rozpor je možné vysvětlit hlavně tím, že pro tvorbu emisí  $\text{NO}_x$  není nejdůležitější průměrná teplota výfukových plynů, ale spíš je potřeba znát průběh teploty ve spalovacím prostoru během vznícení paliva, expanze a výfuku. Celá historie teploty pak může velice dobře vysvětlit důvody oxidace vzdušného dusíku na produkty emisí  $\text{NO}_x$ .

Jediné palivo, které vykazuje souvislost teploty výfukových plynů je **mero50hvo50**, které ve srovnání s čistou motorovou naftou i ostatními biopalivy produkovalo méně emisí  $\text{NO}_x$  a současně i teplota výfukových plynů je nepatrně nižší.



## 6. DISKUZE

V současné době můžeme pozorovat značný společenský tlak požadující snižování negativních dopadů na životní prostředí při používání spalovacích motorů. Tato disertační práce řeší problematiku spotřeby paliva, produkce pevných částic a produkce emisí  $\text{NO}_x$  při použití různých biopaliv. Rešeršní část práce si dala za cíl vysvětlit na řadě příkladů vliv některých biopaliv na produkované emise spalovacími motory.

Zanedbatelný vliv použití biopaliv na spotřebu paliv byl prokázán ve studii Qi & Yang z roku 2017 [119]. Během měření došlo ke zvýšení spotřeby při spalování 10 % podílu HVO v čisté naftě přibližně o 0,5 %. Podíl MEŘO 10 % v motorové naftě vedl k poklesu spotřeby o 0,5 %. Tyto výsledky jsou ve shodě s výsledky této práce.

Z výsledků je patrné, že některé směsná biopaliva mají pozitivní vliv v některých režimech, zatím co v jiných režimech je jejich přínos na produkci emisí značně nepříznivý. Spalování čistého HVO má velice pozitivní vliv na produkci PM při volnoběžných otáčkách, oproti tomu při vysokých otáčkách byla produkce PM výrazně vyšší. Z palivářského hlediska jsou největší rozdíly mezi motorovou naftou a HVO v hustotě a cetanovém čísle. Cetanové číslo popisuje náklonost paliva ke vznícení. Konkrétněji, cetanové číslo je měřítkem zpoždění zapálení paliva. Čím vyšší je cetanové číslo, tím kratší je zpoždění zapálení. Čisté HVO má obecně velmi nízkou mazivost zapříčiněnou hlavně nepřítomností sloučenin síry a kyslíku [120].

Při studiu závěrů, ke kterým došli ostatní autoři, můžeme dojít k závěru, že spalování HVO ve vznětovém motoru má za následek snížení produkce PM i  $\text{NO}_x$  při zachování velmi podobné spotřeby paliva. Toto tvrzení je částečně v rozporu s námi naměřenými hodnotami. Vliv HVO na spotřebu paliva se v této práci nepodařilo statisticky potvrdit. Negativní vliv byl prokázán při spalování **d90hvo05mero05**. Z hlediska spotřeby paliva jsou tedy dosažené výsledky v přibližné shodě s výsledky ostatních autorů například výzkum Happonena [122] To že v této práci nebyl prokázán statisticky významný vliv použitého biopaliva na spotřebu paliva lze přičíst také relativně vysoké nejistotě měření, dané přesností jednotlivých částí, které vstupují do měřicího řetězce.

Zásadní rozdíl oproti předpokladu byl nalezen při srovnání výsledků produkce pevných částic. Zde autor předpokládal pokles produkce PM pro většinu zkoumaných bodů. Pokles produkce pevných částic zaznamenala celá řada autorů. Výzkumy Aatola & Larmi [109]

a Mäkinne & Nylund [110] z roku 2008 a 2011 dokazují, že použití HVO vede ke snížení produkce PM až o 30%. V roce 2012 provedli výzkum Heikkilä & Happonen, kteří použitím HVO jako paliva pro motor ze zemědělského stroje, dosáhli poklesu produkce pevných částic o 35% [124]. Autoři často uvádí jako pravděpodobný důvod změny v produkci emisí hlavně výrazný rozdíl v cetanovém čísle ve srovnání s motorovou naftou. [122],[126] Když budeme podrobněji pozorovat jednotlivé metodiky experimentů a provedeme srovnání s metodikou experimentu provedeného v rámci této disertační práce, zjistíme, že zásadní rozdíl je v systému tvorby směsi. Ve všech experimentech více zmíněných autorů byl použit motor, který jako systém tvorby směsi používal common rail. Motor použitý v našem experimentu byl vybaven řadovým čerpadlem. Použití řadového čerpadla má za následek nižší vstřikovací tlaky a proud paliva je při otevírání a zavírání vstřikovače výrazně nižší. Následkem tohoto můžeme prohlásit, že použití čistého HVO nebo směsi s vysokým obsahem HVO má za následek zvýšenou produkci emisí PM. Jediné palivo, které se tomuto trendu značně vymyká je **mero50hvo50**. I přes vysoký podíl HVO bylo při spalování tohoto paliva dosaženo stabilně nízké produkce PM ve srovnání s čistou motorovou naftou. To lze vysvětlit tak, že palivo **mero50hvo50** má hustotu srovnatelnou s čistou motorovou naftou a svůj podíl na snížení produkce PM bude mít i kyslík vázaný v MEŘO. Viskozita tohoto paliva je nejvyšší ze všech zkoumaných paliv. Cetanový index a výhřevnost je velmi podobná motorové naftě. Lze se tedy domnívat, že kombinace palivářských vlastností MEŘO a HVO měla za následek vytvoření směsi, která potlačuje některé problémy HVO a takto vzniklé palivo je vhodné k použití i v motoru podobné konfigurace.

Autoři Qi & Zhang [119] v roce 2017 zkoumali vliv směsných biopaliv na provozní parametry vznětového motoru. Paliva použitá ve výzkumu byla tvořena podílem motorové nafty, ethanolu a tungovým olejem. Takto zkombinovaná paliva jsou velice podobná námi testovanému palivu **d80e10mero10**. Podobnost spočívá v podobných podílech čisté motorové nafty, ethanolu jako alkoholového paliva a tungového oleje jako zástupce paliv s olejnatým základem. Autoři potvrzují námi zjištěné výsledky. Nepatrný, ale pozitivní, vliv na spotřebu paliva a pokles produkce PM (kouřivosti) i produkce emisí NO<sub>x</sub>.

V rešerši již byl zmíněn závěr práce [83], ethanol v čisté naftě v 10% koncentraci vede v některých režimech k poklesu produkce PM. Tento závěr ale nelze z provedených měření a získaných dat potvrdit ani vyvrátit.

Závěrem lze tedy konstatovat, že správnou směsí různých biopaliv lze dosáhnout zajímavých výsledků co se produkce emisí  $\text{NO}_x$  a pevných částic týká. Vliv biopaliv na spotřebu paliva se analýzou neprokázal. Největších rozdílů bylo dosaženo jednoznačně v režimech volnoběžných otáček. Z výsledků měření je tedy zřejmé, že v případě že je motor provozován pod zatížením, tak již od velmi malých hodnot zatížení je spotřeba paliva v podstatě shodná. Byly naměřeny rozdíly, které ovšem lze také přičíst řadě dalších faktorů, které měření ovlivňují.

Vliv metylesteru řepkového oleje ve směsi biopaliva je velice závislý na koncentraci. Biopalivo označené **mero50hvo50** mělo za následek pokles produkce PM téměř v celém rozsahu, přičemž jednoznačně nejlepších výsledků bylo dosaženo při volnoběžných otáčkách. Stejně tak tato směs vykazuje mírný pokles produkce emisí  $\text{NO}_x$ . Tento závěr je částečně potvrzen prací [86], kde došlo k poklesu produkce PM, ale nárůstu produkce  $\text{NO}_x$ . V našem případě lze pokles produkce PM i emisí  $\text{NO}_x$  přičíst hlavně přítomnosti 50% podílu HVO ve směsi. Vliv HVO dobře popisuje [108], který během měření zjistil, že provoz motoru na čisté HVO snižuje produkci emisí  $\text{NO}_x$  přibližně o 5 %.

Diskuze nad tímto palivem je záměrně umístěna až na samý závěr tohoto odstavce. Závěr bych rád prohlásil, že výsledky, kterých bylo dosaženo při spalování tohoto paliva, považuji za nejlepší ve všech zkoumaných ohledech. Při spalování mero50hvo50 nebyla zaznamenána zvýšená spotřeba paliva. Produkce PM byla nižší než u ostatních sledovaných paliv a produkce emisí  $\text{NO}_x$  byla také nižší.

Vytvoření a ověření vhodného biopaliva by pak mělo za následek zmenšení nebo úplné zastavení uvolňování skleníkových plynů do atmosféry a tím zastavení nebo omezení jejich vlivů. Jednou z možných cest, jak získat čistší místo pro život je odmítnutí dogmatu, že všechny plyny vypouštěné do atmosféry při provozu spalovacích motorů jsou trvale škodlivé. V posledních letech je na výrobce spalovacích motorů vyvíjet tlak ke snižování spotřeby paliva a tím i snížení uvolňovaného  $\text{CO}_2$ . Nedomnívám se, že to je nezbytně nutné. I přestože se tato práce primárně produkcí  $\text{CO}_2$  nezabývala je tento plyn hlavním důvodem jejího vzniku. Tlak na výrobce měl za následek vývoj motorů, které se svými parametry velmi přiblížily k současným technologickým limitům. Další úspora paliva bude pravděpodobně vykoupěna dalším růstem jiných škodlivin, například oxidy dusíku nebo pevné částice. Již nastíněná cesta se snaží pojmout problematiku biopaliv z jiného úhlu pohledu. V případě, že vývoj spalovacích motorů přestane ubírat směrem k nižší spotřebě a tím nižším emisím  $\text{CO}_2$

bude možné věnovat více prostředků na snižování opravdu škodlivých emisí i za cenu vyšší okamžité produkce CO<sub>2</sub>. Tento nárůst by měl být kompenzován právě výraznějším využitím biopaliv. Do atmosféry bude sice při spalování paliva v motorech uvolňováno víc CO<sub>2</sub>, ale to bude z atmosféry jímáno při výrobě biopaliv. Celková bilance CO<sub>2</sub> by se mohla přiblížit nule. Ostatní emise, které byly předmětem zkoumání této práce, bude možné potlačit vhodnějším spalováním paliva a čistšími způsoby výroby biopaliv.

## 7. ZÁVĚR

Disertační práce se zabývala vlivem biopaliv na provozní parametry traktorového vznětového motoru. V úvodu práce byla provedena rešerše, jejíž poznatky vedly k výběru několika druhů perspektivních biopaliv s ohledem na jejich potenciální možnost masivnějšího využití ve spalovacích motorech a i jako náhrady za v současnosti převážně využívaná fosilní paliva. Experimentální náplň práce byla zaměřena na paliva použitelná ve vznětových motorech díky širší paletě biopaliv. Pro experimenty byl zvolen traktorový přeplňovaný vznětový motor Zetor model 1505, který je ideální z hlediska nižších nároků na kvalitu použitého paliva díky jeho robustní konstrukci zejména palivové soustavy s řadovým vstřikovacím čerpadlem mazaným motorovým olejem. Další výhodou použití traktorového motoru je jeho častý provoz v ustálených režimech blízkých oblasti maximálního zatížení. Jak vyplynulo z rešerše, tyto podmínky jsou vhodné právě pro provoz motoru na vybraná biopaliva.

Neméně důležitým krokem bylo vybrat vhodná biopaliva a případně stanovit jejich koncentrace. Je možné vybírat ze dvou základních druhů biopaliv, alkoholových paliv a paliv na bázi oleje. Jako zástupce alkoholových paliv je nejčastěji používán bioethanol, který je v současné době již velmi rozšířený a užívaný zejména v zážehových motorech. V provedených experimentech byl bioetanol díky svým méně vhodným vlastnostem pro využití ve vznětovém motoru testován jen jako nízkoprocentní příměs. Paleta biopaliv na bázi oleje je pro vznětové motory velmi pestrá. Mezi neopomenutelné zástupce patří již také velmi rozšířený methylester řepkového oleje. Z rešerše dále vyplývá, že velmi vhodným kandidátem na biopalivo s potenciálem nahradit fosilní motorovou naftu je hydrogenovaný rostlinný olej.

Podobně jako u výběru biopaliv je při studiu emisí sledovat dvě základní složky, regulované a neregulované. Mezi regulované složky emisí patří CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC a pevné částice. Ze všech těchto složek byly pro účely této práce a s ohledem na její rozsah vybrány pouze NO<sub>x</sub> a pevné částice. Hlavním argumentem pro výběr těchto složek byla skutečnost, že na snižování produkce škodlivých emisí motorů jsou v současné době vynakládány velké finanční i intelektuální kapacity. Obě z těchto složek mají velmi negativní vliv nejen na lidské zdraví, ale i na životní prostředí.

Statistické testování proběhlo hypotéz pomocí dvouvýběrového párového t-testu. Všechna biopaliva byla ve všech režimech porovnána s čistou motorovou naftou. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách napříč kapitolou 5.2. Výsledky, kde jsou podrobně komentovány.

Kapitole diskuze shrnuje celkově výsledky i s možným vysvětlením proč byly získány takovéto hodnoty.

Celkově lze výsledky experimentu shrnout takto:

- Vliv na spotřebu paliva nebyl prokázán. Hypotéza 1 je až na dvě zkoumané situace potvrzena.
- Vliv biopaliv na produkci pevných částic a průběh křivek velikostních spekter PM byl prokázán. Hypotéza 2 je až na několik popsanych případů zamítnuta.
- Vliv biopaliv na produkci emisí  $\text{NO}_x$  nebyl prokázán. Hypotéza 3 je až na jeden bod potvrzena.

Obecně lze přijmout tvrzení, že při spalování biopaliv v motoru s přípravou směsi pomocí řadového vstřikovacího čerpadla není vhodné používat čisté HVO nebo směsi motorové nafty a HVO. Dále není vhodné používat biopaliva s obsahem alkoholu. Za těchto podmínek došlo k nárůstu produkce PM hlavně při nízkých otáčkách. Navíc jsou produkované částice velmi malé, jedná se o částice nukleačního modu, a jak z rešerše vyplývá, je pravděpodobné, že tyto částice jsou potenciálně velmi nebezpečné. Jako velice vhodné se ukazuje použití paliva, které je tvořeno podílem 50% HVO a 50% MEŘO a toto palivo lze 100% vyrobit z obnovitelných zdrojů. Okamžité hodnoty produkce škodlivých emisí, zkoumaných v rámci disertační práce, byly nižší ve srovnání s motorovou naftou. Z testovaných paliv lze toto jako jediné doporučit pro využití ve spalovacích motorech z hlediska produkce škodlivých emisí.

Snahou této disertační práce bylo doplnit a rozšířit znalosti o spalování biopaliv ve vznětových motorech se zohledněním aspektu produkce emisí. Disertační práce je dalším dílkem skládačky lidského poznání, která sleduje nalezení energetického zdroje pro stroje a zařízení, který je obnovitelný a trvale udržitelný. Obecným cílem práce bylo pomoci navrhnout vhodné biopalivo, které by mělo využití primárně v zemědělství, kde by vstupní surovinou mohly být například odpady při zpracování potravin. Vhodně navržené biopalivo se může stát vstupním parametrem při návrhu konstrukce spalovacího motoru, jehož parametry

jsou navrženy tak, aby došlo k optimálnímu využití veškerého potenciálu paliva. Každý z těchto jednotlivých kroků je nezbytný k tomu, aby došlo k minimalizaci dopadů používání spalovacích motorů na životní prostředí.

Další pokračování v započatých experimentech je nezbytné hned z několika důvodů. Předně je problematika biopaliv a jejich vlivu na provozní parametry motorů není stále bezezbytku probádaná. V odborné literatuře jsou sice popsány stovky experimentů, ale stále nelze ani zdaleka prohlásit, že je výzkum hotový a výsledky si někdy navíc navzájem i odporují. Jako další důvod proč pokračovat může být uveden klasicky používané argumentaci o konečném množství fosilních paliv na naší planetě.

Z výše uvedených důvodů je zřejmé, že zkoumaná problematika je velice komplexní. Vypracovaná disertační práce přidává pouze svůj malý díl do celkového objemu znalostí a je dalším krokem k celkovému porozumění problematice biopaliv.

## 8. SEZNAM LITERATURY

- [1] HROMÁDKO, J., J. HROMÁDKO, V. HÖNIG a P. MILER. *Spalovací motory*. B.m.: Grada, 2011.
- [2] WILLIAMS, D.R. *Earth Fact Sheet* [online]. 2016. Dostupné z: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>
- [3] CERVELLIN, G., I. COMELLI, G. RASTELLI, A. PICANZA a G. LIPPI. Initial blood lactate correlates with carboxyhemoglobin and clinical severity in carbon monoxide poisoned patients. *Clinical Biochemistry* [online]. 2014, **47**(18). Dostupné z: doi:10.1016/j.clinbiochem.2014.09.016
- [4] IPCC FOURTH ASSESSMENT REPORT: CLIMATE CHANGE. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. *Intergovernmental panel on climate change*. 2007.
- [5] BAUMRUK, P. *Příslušenství spalovacích motorů*. B.m.: CVUT, 1996. ISBN 80-01-02062-2.
- [6] BARDODĚJ, Z. *Chemie v hygieně a toxikologii*. B.m.: Vydavatelství Karolinum, 1994. ISBN 80-7066-911-X.
- [7] CDIAC. *Global CO2 Emissions from Fossil-Fuel Burning* [online]. 2016. Dostupné z: [http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1751\\_2011.ems](http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1751_2011.ems)
- [8] DORMANN, K., R.G. BROWN a T. DAVID. The role of nitric oxide in neurovascular coupling. *Journal of Theoretical Biology* [online]. 2016, **394**. Dostupné z: doi:10.1016/j.jtbi.2016.01.009
- [9] GUMUS, Metin, Cenk SAYIN a Mustafa CANAKCI. The impact of fuel injection pressure on the exhaust emissions of a direct injection diesel engine fueled with biodiesel-diesel fuel blends. *Fuel* [online]. 2012, **95**, 486–494. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2011.11.020



- [10] GÓMEZ-GARCÍA, M.A., V. PITCHON a A. KIENNEMANN. Pollution by nitrogen oxides: An approach to NO<sub>x</sub> abatement by using sorbing catalytic materials. *Environment International* [online]. 2005, **31**(3). Dostupné z: doi:10.1016/j.envint.2004.09.006
- [11] VOJTISEK-LOM, M., M. PECHOUT, L. DITTRICH, V. BERÁNEK, M. KOTEK, J. SCHWARZ, P. VODIČKA, A. MILCOVÁ, A. ROSSNEROVÁ, A. AMBROŽ a J. TOPINKA. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and their genotoxicity in exhaust emissions from a diesel engine during extended low-load operation on diesel and biodiesel fuels. *Atmospheric Environment* [online]. 2015, **109**. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2015.02.077
- [12] RHEAD, M.M. a S.A. HARDY. The sources of polycyclic aromatic compounds in diesel engine emissions. *Fuel* [online]. 2003, **82**(4). Dostupné z: doi:10.1016/S0016-2361(02)00314-9
- [13] IRZ. *Polycyklické aromatické uhlovodíky* [online]. 2016. Dostupné z: [http://www.irz.cz/repository/latky/polycyklicke\\_aromaticke\\_uhlovodiky.pdf](http://www.irz.cz/repository/latky/polycyklicke_aromaticke_uhlovodiky.pdf)
- [14] SEINFELD, John a Pandis SPYROS. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 1998. ISBN 0-471-17816-0.
- [15] <https://www.epa.gov/>. 2017.
- [16] TREE, Dale R. a Kenth I. SVENSSON. *Soot processes in compression ignition engines* [online]. 2007 [vid. 2017-03-30]. ISBN 0360-1285. Dostupné z: doi:10.1016/j.pecs.2006.03.002
- [17] MATTI MARICQ, M. Chemical characterization of particulate emissions from diesel engines: A review. *Journal of Aerosol Science* [online]. 2007, **38**(11). Dostupné z: doi:10.1016/j.jaerosci.2007.08.001
- [18] AAKKO, P. *Pah content of diesel fuel and automotive emission* [online]. 2006. Dostupné z: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2006/vtt-1155-06-arom.pdf>

- [19] KITTELSON, D. Engines and Nanaoparticles: A Review. *Journal of Aerosol Science* [online]. 1997, **29**(5), 575–588 [vid. 2017-05-19]. Dostupné z: [http://ac.els-cdn.com/S0021850297100374/1-s2.0-S0021850297100374-main.pdf?\\_tid=941453e6-3c61-11e7-90b5-00000aacb35e&acdnat=1495177725\\_5b4d35ef323f0c8141b4db91dc88161b](http://ac.els-cdn.com/S0021850297100374/1-s2.0-S0021850297100374-main.pdf?_tid=941453e6-3c61-11e7-90b5-00000aacb35e&acdnat=1495177725_5b4d35ef323f0c8141b4db91dc88161b)
- [20] DOHÁNYOSOVÁ, Pavla, Lena KUBINCOVÁ, Jiří SMOLÍK, Jaroslav SCHWARZ a Vladimír ŽDÍMAL. VÝKLADOVÝ SLOVNÍK AEROSOLOVÝCH TERMÍNŮ Na překladu a korekturách pracovali. *J* [online]. 2001 [vid. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://cas.icpf.cas.cz/download/Aerosolovnik.pdf>
- [21] PATIL, V., K.-Q. TRAN a H.R. GISELRØD. Towards sustainable production of biofuels from microalgae. *International Journal of Molecular Sciences* [online]. 2008, **9**(7). Dostupné z: doi:10.3390/ijms9071188
- [22] CZERWINSKI, J., Y. ZIMMERLI, A. MAYER, N. HEEB, H. BERGER a G. D'URBANO. Testing of SCR-systems on HD-vehicles-TeVeNOx. *SAE Technical Papers* [online]. 2014, **1**. Dostupné z: doi:10.4271/2014-01-1569
- [23] CZYRNEK-DELÊTRE, Magdalena M., Beatrice M. SMYTH a Jerry D. MURPHY. Beyond carbon and energy: The challenge in setting guidelines for life cycle assessment of biofuel systems. *Renewable Energy* [online]. 2017, **105**, 436–448 [vid. 2017-04-28]. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2016.11.043
- [24] PAPALEXANDROU, M.A., P.A. PILAVACHI a A.I. CHATZIMOURATIDIS. Evaluation of liquid bio-fuels using the Analytic Hierarchy Process. *Process Safety and Environmental Protection* [online]. 2008, **86**(5), 360–374 [vid. 2017-08-11]. ISSN 09575820. Dostupné z: doi:10.1016/j.psep.2008.03.003
- [25] CHERUBINI, Francesco. GHG balances of bioenergy systems – Overview of key steps in the production chain and methodological concerns. *Renewable Energy* [online]. 2010, **35**(7), 1565–1573 [vid. 2017-04-28]. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2009.11.035
- [26] HROMÁDKO, J., J. HROMÁDKO, P. MILER, V. HÖNIG a P. ŠTĚRBA. Life cycle assessment of fossil fuels and bioethanol | Hodnocení životního cyklu fosilních paliv a bioetanolu. *Listy Cukrovarnické a Reparské*. 2009, **125**(11).

- [27] VOLOSHIN, Roman A., Margarita V. RODIONOVA, Sergey K. ZHARMUKHAMEDOV, T. NEJAT VEZIROGLU a Suleyman I. ALLAKHVERDIEV. Review: Biofuel production from plant and algal biomass. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2016, **41**(39), 17257–17273 [vid. 2017-03-29]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2016.07.084
- [28] GAURAV, N., S. SIVASANKARI, G.S. KIRAN, A. NINAWA a J. SELVIN. Utilization of bioresources for sustainable biofuels: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, **73**. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2017.01.070
- [29] MIKULEC, Jozef, Ján CVENGROŠ, Eudmila JORÍKOVÁ, Marek BANIČ a Andrea KLEINOVÁ. Second generation diesel fuel from renewable sources. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2010, **18**(9), 917–926 [vid. 2017-03-31]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2010.01.018
- [30] BRUTON, Tom, Henry LYONS, Yannick LERAT, Michele STANLEY a Michael Bo RASMUSSEN. A Review of the Potential of Marine Algae as a Source of Biofuel in Ireland. *Sustainable Energy Ireland Dublin* [online]. 2009. ISSN 0196-8904. Dostupné z: doi:10.1016/j.envint.2003.08.001
- [31] SANCHEZ RIZZA, Lara, Maria Eugenia SANZ SMACHETTI, Mauro DO NASCIMENTO, Graciela Lidia SALERNO a Leonardo CURATTI. Bioprospecting for native microalgae as an alternative source of sugars for the production of bioethanol. *Algal Research* [online]. 2017, **22**, 140–147 [vid. 2017-03-31]. ISSN 22119264. Dostupné z: doi:10.1016/j.algal.2016.12.021
- [32] GANGULY, A., P. K. CHATTERJEE a A. DEY. *Studies on ethanol production from water hyacinth - A review* [online]. 2012 [vid. 2017-03-31]. ISBN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2011.09.018
- [33] MALIK, Anushree. Environmental challenge vis a vis opportunity: The case of water hyacinth. *Environment International* [online]. 2007, **33**(1), 122–138 [vid. 2017-03-31]. ISSN 01604120. Dostupné z: doi:10.1016/j.envint.2006.08.004

- [34] KOTEK, T., M. KOTEK, P. JINDRA a M. PEXA. Determination of the optimal injection time for adaptation SI engine on E85 fuel using self-designed auxiliary control unit. *Agronomy Research*. 2015, **13**(2).
- [35] KOTEK, M., J. HROMÁDKO, P. MILER, T. KOTEK a K. PLUHAŘ. Application of E85 fuel in 1.2 HTP engine | Aplikace paliva E85 v motoru 1.2 HTP. *Listy Cukrovarnické a Reparské*. 2013, **129**(7–8).
- [36] MUŽÍKOVÁ, Z., J. KÁŇA, M. POSPÍŠIL a G. ŠEBOR. Fyzikálně-chemické vlastnosti butanol-benzínových směsí. *APROCHEM 2009* [online]. 2009. Dostupné z: [http://www.petroleum.cz/upload/aprochem2009\\_204.pdf](http://www.petroleum.cz/upload/aprochem2009_204.pdf)
- [37] Bezpečnostní list podle Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1907/2006, ve znění směrnice 453/2010/ES. [www.ceproas.cz](http://www.ceproas.cz). [online]. Dostupné z: [https://www.ceproas.cz/public/data/pdf/bezpecnost/listy/E85\\_ČEPRO\\_REACH\\_CL\\_P\\_6\\_3\\_2015.pdf](https://www.ceproas.cz/public/data/pdf/bezpecnost/listy/E85_ČEPRO_REACH_CL_P_6_3_2015.pdf)
- [38] MAXA, D. Použití paliva E85 v palivové soustavě zážehových motorů konstruovaných pro automobilový benzín. [paliva.vscht.cz](http://paliva.vscht.cz) [online]. 2013. Dostupné z: [paliva.vscht.cz/download.php?id=100](http://paliva.vscht.cz/download.php?id=100)
- [39] Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources. 2009.
- [40] HROMÁDKO, J., J. HROMÁDKO, P. MILER, V. HÖNIG a P. ŠTĚRBA. Use of bioethanol in combustion engines | Využití bioethanolu jako paliva ve spalovacích motorech. *Chemické Listy*. 2011, **105**(2).
- [41] SCHOLL, Angélica Luisi, Daiane MENEGOL, Ana Paula PITARELO, Roselei Claudete FONTANA, Arion Zandoná FILHO, Luiz Pereira RAMOS, Aldo José Pinheiro DILLON a Marli CAMASSOLA. Ethanol production from sugars obtained during enzymatic hydrolysis of elephant grass (*Pennisetum purpureum*, Schum.) pretreated by steam explosion. *Bioresource Technology* [online]. 2015, **192**, 228–237 [vid. 2017-03-28]. ISSN 18732976. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2015.05.065

- [42] VÁŇA, J. a Z. KRATOCHVÍL. Vývoj technologie výroby bioetanolu ze slámy v České republice úspěšně ukončen. *biom.cz* [online]. 2002, ISSN: 1801-2655. Dostupné z: [biom.cz/cz/odborne-clanky/vyvoj-technologie-vyroby-bioetanolu-ze-slamy-v-ceske-republice-uspesne-ukoncen](http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyvoj-technologie-vyroby-bioetanolu-ze-slamy-v-ceske-republice-uspesne-ukoncen)
- [43] BOUCHER, Jérémy, Christine CHIRAT a Dominique LACHENAL. Extraction of hemicelluloses from wood in a pulp biorefinery, and subsequent fermentation into ethanol. *Energy Conversion and Management* [online]. 2014, **88**, 1120–1126 [vid. 2017-03-28]. ISSN 01968904. Dostupné z: [doi:10.1016/j.enconman.2014.05.104](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.104)
- [44] SARKAR, Nibedita, Sumanta Kumar GHOSH, Satarupa BANNERJEE a Kaustav AIKAT. *Bioethanol production from agricultural wastes: An overview* [online]. leden 2012 [vid. 2017-03-28]. ISBN 0960-1481. Dostupné z: [doi:10.1016/j.renene.2011.06.045](https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.045)
- [45] TAHERZADEH, Mohammad J. a Keikhosro KARIMI. *Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: A review* [online]. 1. září 2008 [vid. 2017-03-28]. ISBN 8415683111. Dostupné z: [doi:10.3390/ijms9091621](https://doi.org/10.3390/ijms9091621)
- [46] SLADKÝ, V. Biobutanol – vhodnější náhrada benzínu. *biom.cz* [online]. 2007, ISSN: 1801-2655. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biobutanol-vhodnejsi-nahrada-benzinu>
- [47] JIN, C., M. YAO, H. LIU, C.-F.F. LEE a J. JI. Progress in the production and application of n-butanol as a biofuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2011, **15**(8). Dostupné z: [doi:10.1016/j.rser.2011.06.001](https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.06.001)
- [48] TRINDADE, W.R.D.S. a R.G.D. SANTOS. Review on the characteristics of butanol, its production and use as fuel in internal combustion engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, **69**. Dostupné z: [doi:10.1016/j.rser.2016.11.213](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.213)
- [49] MORADI, Farzad, Hamid AMIRI, Sabihe SOLEIMANIAN-ZAD, Mohammad Reza EHSANI a Keikhosro KARIMI. Improvement of acetone, butanol and ethanol production from rice straw by acid and alkaline pretreatments. *Fuel* [online]. 2013, **112**, 8–13 [vid. 2017-03-28]. ISSN 00162361. Dostupné z: [doi:10.1016/j.fuel.2013.05.011](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.011)

- [50] POSPÍŠIL, M., J. ŠIŠKA a G. ŠEBOR. Biobutanol jako pohonná hmota v dopravě. *biom.cz* [online]. 2008. Dostupné z: <http://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/biobutanol-jako-pohonn-hmota-v-doprav.pdf>
- [51] POSPÍŠIL, M., J. ŠIŠKA a G. ŠEBOR. Biobutanol jako pohonná hmota v dopravě. *biom.cz* [online]. 2008 [vid. 2017-03-22]. Dostupné z: <http://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/biobutanol-jako-pohonn-hmota-v-doprav.pdf>
- [52] SIRVIÖ, K., S. NIEMI, V. VAUHKONEN a E. HILTUNEN. Antioxidant studies for animal-based fat methyl ester. *Agronomy Research*. 2014, **12**(2).
- [53] NAIK, S.N., V.V. GOUD, P.K. ROUT a A.K. DALAI. Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2010, **14**(2). Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2009.10.003
- [54] ŠEBOR, G., M. POSPÍŠIL a J. ŽÁKOVEC. *Technicko – ekonomická analýza vhodných alternativních paliv v dopravě*. 2006.
- [55] ISSARIYAKUL, T. a A.K. DALAI. Biodiesel from vegetable oils. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, **31**. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2013.11.001
- [56] ARVIDSSON, R., S. PERSSON, M. FRÖLING a M. SVANSTRÖM. Life cycle assessment of hydrotreated vegetable oil from rape, oil palm and Jatropha. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2011, **19**(2–3). Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2010.02.008
- [57] ŠIMÁČEK, Pavel, Dan VRTIŠKA, Zlata MUŽÍKOVÁ a Milan POSPÍŠIL. MOTOROVÁ PALIVA VYRÁBĚNÁ HYDROGENACÍ ROSTLINNÝCH OLEJŮ A ŽIVOČIŠNÝCH TUKŮ. *Chemické Listy*. 2017, **111**, 206–212.
- [58] XU, J., J. JIANG a J. ZHAO. Thermochemical conversion of triglycerides for production of drop-in liquid fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, **58**. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2015.12.315

- [59] CHAUHAN, Bhupendra Singh, Naveen KUMAR, Yong DU JUN a Kum Bae LEE. Performance and emission study of preheated Jatropha oil on medium capacity diesel engine. *Energy* [online]. 2010, **35**(6), 2484–2492 [vid. 2017-04-02]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2010.02.043
- [60] SU, Yujie, Peidong ZHANG a Yuqing SU. An overview of biofuels policies and industrialization in the major biofuel producing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, **50**, 991–1003 [vid. 2017-04-13]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2015.04.032
- [61] LANZER, T., O.F. VON MEIEN a C.I. YAMAMOTO. A predictive thermodynamic model for the Brazilian gasoline. *Fuel* [online]. 2005, **84**(9), 1099–1104 [vid. 2017-04-02]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2005.01.017
- [62] AL-HASAN, M. Effect of ethanol–unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission. *Energy Conversion and Management* [online]. 2003, **44**(9), 1547–1561 [vid. 2017-04-02]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/S0196-8904(02)00166-8
- [63] COSTA, Rodrigo C. a José R. SODRÉ. Compression ratio effects on an ethanol/gasoline fuelled engine performance. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2011, **31**(2), 278–283 [vid. 2017-04-02]. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2010.09.007
- [64] HE, Bang-Quan, JIAN-XIN WANG, Ji-Ming HAO, Xiao-Guang YAN a Jian-Hua XIAO. A study on emission characteristics of an EFI engine with ethanol blended gasoline fuels. *Atmospheric Environment* [online]. 2003, **37**(7), 949–957 [vid. 2017-04-02]. ISSN 13522310. Dostupné z: doi:10.1016/S1352-2310(02)00973-1
- [65] LI, Yu, Jinke GONG, Yuanwang DENG, Wenhua YUAN, Jun FU a Bin ZHANG. Experimental comparative study on combustion, performance and emissions characteristics of methanol, ethanol and butanol in a spark ignition engine. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2017, **115**, 53–63 [vid. 2017-04-02]. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.12.037

- [66] KIM, Namho, Seokwon CHO a Kyoungdoug MIN. A study on the combustion and emission characteristics of an SI engine under full load conditions with ethanol port injection and gasoline direct injection. *Fuel* [online]. 2015, **158**, 725–732 [vid. 2017-04-02]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2015.06.025
- [67] DHAMODARAN, G., G.S. ESAKKIMUTHU, Y.K. POCHAREDDY a H. SIVASUBRAMANIAN. Investigation of n-butanol as fuel in a four-cylinder MPFI SI engine. *Energy* [online]. 2017, **125**. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2017.02.134
- [68] YANG, W. M., H. AN, S. K. CHOU, K. J. CHUA, B. MOHAN, V. SIVASANKARALINGAM, V. RAMAN, A. MAGHBOULI a J. LI. Impact of emulsion fuel with nano-organic additives on the performance of diesel engine. *Applied Energy* [online]. 2013, **112**, 1206–1212 [vid. 2017-03-28]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2013.02.027
- [69] ZHANG, Zhi Hui a Rajasekhar BALASUBRAMANIAN. Influence of an iron-based fuel-borne catalyst on physicochemical and toxicological characteristics of particulate emissions from a diesel engine. *Applied Energy* [online]. 2015, **146**, 270–278 [vid. 2017-03-28]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2015.02.029
- [70] WANG, Zhi, Haoye LIU, Jun ZHANG, Jianxin WANG a Shijin SHUAI. Performance, Combustion and Emission Characteristics of a Diesel Engine Fueled with Polyoxymethylene Dimethyl Ethers (PODE3-4)/ Diesel Blends. In: *Energy Procedia* [online]. 2015, s. 2337–2344 [vid. 2017-03-28]. ISBN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2015.07.479
- [71] LIU, Haoye, Zhi WANG, Jianxin WANG a Xin HE. Improvement of emission characteristics and thermal efficiency in diesel engines by fueling gasoline/diesel/PODEn blends. *Energy* [online]. 2016, **97**, 105–112 [vid. 2017-03-28]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2015.12.110
- [72] ZHU, Mingming, Yu MA a Dongke ZHANG. Effect of a homogeneous combustion catalyst on the combustion characteristics and fuel efficiency in a diesel engine. *Applied Energy* [online]. 2012, **91**(1), 166–172 [vid. 2017-03-28]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2011.09.007



- [73] DEC, John E. Advanced compression-ignition engines - Understanding the in-cylinder processes. *Proceedings of the Combustion Institute* [online]. 2009, **32 II**(2), 2727–2742 [vid. 2017-03-28]. ISSN 15407489. Dostupné z: doi:10.1016/j.proci.2008.08.008
- [74] YAO, Mingfa, Zhaolei ZHENG a Haifeng LIU. *Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines* [online]. říjen 2009 [vid. 2017-03-28]. ISBN 0360-1285. Dostupné z: doi:10.1016/j.peccs.2009.05.001
- [75] VALENTINO, Gerardo, Felice E. CORCIONE, Stefano E. IANNUZZI a Simone SERRA. Experimental study on performance and emissions of a high speed diesel engine fuelled with n-butanol diesel blends under premixed low temperature combustion. *Fuel* [online]. 2012, **92**(1), 295–307 [vid. 2017-03-28]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2011.07.035
- [76] DOĞAN, Oğuzhan. The influence of n-butanol/diesel fuel blends utilization on a small diesel engine performance and emissions. *Fuel* [online]. 2011, **90**(7), 2467–2472 [vid. 2017-03-28]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2011.02.033
- [77] TUTAK, Wojciech, Arkadiusz JAMROZIK, Michał PYRC a Michał SOBIEPAŃSKI. Investigation on combustion process and emissions characteristic in direct injection diesel engine powered by wet ethanol using blend mode. *Fuel Processing Technology* [online]. 2016, **149**, 86–95 [vid. 2017-03-28]. ISSN 03783820. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuproc.2016.04.009
- [78] ARMAS, O., M.D. CORDENAS a C. MATA. Smoke opacity and NO<sub>x</sub> emissions from a bioethanol-diesel blend during engine transient operation. *SAE Technical Papers* [online]. 2007, **15**. Dostupné z: doi:10.4271/2007-24-0131
- [79] MERRITT, P.M., V. ULMET, R.L. MCCORMICK, W.E. MITCHELL a K.J. BAUMGARD. Regulated and unregulated exhaust emissions comparison for three tier II Non-road diesel engines operating on ethanol-diesel blends. *SAE Technical Papers* [online]. 2005. Dostupné z: doi:10.4271/2005-01-2193
- [80] AHMED, I. Oxygenated diesel: Emissions and performance characteristics of ethanol-diesel blends in CI engines. *SAE Technical Papers* [online]. 2001. Dostupné z: doi:10.4271/2001-01-2475

- [81] LAPUERTA, Magín, Octavio ARMAS a José M. HERREROS. Emissions from a diesel–bioethanol blend in an automotive diesel engine. *Fuel* [online]. 2008, **87**(1), 25–31 [vid. 2017-03-30]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2007.04.007
- [82] SAYIN, Cenk. Engine performance and exhaust gas emissions of methanol and ethanol-diesel blends. *Fuel* [online]. 2010, **89**(11), 3410–3415. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2010.02.017
- [83] PRBAKARAN, B. a D. VISWANATHAN. Experimental investigation of effects of addition of ethanol to bio-diesel on performance, combustion and emission characteristics in CI engine. *Alexandria Engineering Journal* [online]. 2016. Dostupné z: doi:10.1016/j.aej.2016.09.009
- [84] ŞAHIN, Zehra, Orhan DURGUN a Orhan N. AKSU. Experimental investigation of n-butanol/diesel fuel blends and n-butanol fumigation - Evaluation of engine performance, exhaust emissions, heat release and flammability analysis. *Energy Conversion and Management* [online]. 2015, **103**, 778–789 [vid. 2017-03-30]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2015.06.089
- [85] RAKOPOULOS, Constantine D., Athanasios M. DIMARATOS, Evangelos G. GIAKOUMIS a Dimitrios C. RAKOPOULOS. Investigating the emissions during acceleration of a turbocharged diesel engine operating with bio-diesel or n-butanol diesel fuel blends. *Energy* [online]. 2010, **35**(12), 5173–5184 [vid. 2017-03-31]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2010.07.049
- [86] CHENG, Xiaobei, Shuai LI, Jin YANG a Bei LIU. Investigation into partially premixed combustion fueled with N-butanol-diesel blends. *Renewable Energy* [online]. 2016, **86**, 723–732. ISSN 18790682. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2015.08.067
- [87] KOZAK, Miłosław J. Exhaust Emissions from a Diesel Passenger Car Fuelled with a Diesel Fuel-Butanol Blend. *SAE Technical Papers* [online]. 2011. Dostupné z: doi:10.4271/2011-28-0017
- [88] ARMAS, Octavio, Reyes GARCÍA-CONTRERAS a Ángel RAMOS. Pollutant emissions from engine starting with ethanol and butanol diesel blends. *Fuel Processing Technology* [online]. 2012, **100**, 63–72 [vid. 2017-03-31]. ISSN 03783820. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuproc.2012.03.003

- [89] FANICK, E Robert. Fuel and Fuel Additive Registration Testing of Ethanol- Diesel Blend for O 2 Diesel , Inc . Fuel and Fuel Additive Registration Testing of Ethanol- Diesel Blend for O 2 Diesel , Inc . 2004, (February).
- [90] REGION, Bio Fuel. Short report from emission test using low blend of ethanol derivative in diesel fuel. 2009, (March).
- [91] MIERS, S.A., R.W. CARLSON, S.S. MCCONNELL, H.K. NG, T. WALLNER a J.L. ESPER. Drive cycle analysis of butanol/diesel blends in a light-duty vehicle. *SAE Technical Papers* [online]. 2008. Dostupné z: doi:10.4271/2008-01-2381
- [92] BHUIYA, M.M.K., M.G. RASUL, M.M.K. KHAN, N. ASHWATH a A.K. AZAD. Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel - Part: 1 Selection of feedstocks, oil extraction techniques and conversion technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, **55**. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2015.04.163
- [93] JAYED, M.H., H.H. MASJUKI, R. SAIDUR, M.A. KALAM a M.I. JAHIRUL. Environmental aspects and challenges of oilseed produced biodiesel in Southeast Asia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2009, **13**(9), 2452–2462 [vid. 2017-03-31]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2009.06.023
- [94] SRIVASTAVA, Anjana a Ram PRASAD. Triglycerides-based diesel fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2000, **4**(2), 111–133 [vid. 2017-03-31]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/S1364-0321(99)00013-1
- [95] ATABANI, A.E., A.S. SILITONGA, H.C. ONG, T.M.I. MAHLIA, H.H. MASJUKI, Irfan Anjum BADRUDDIN a H. FAYAZ. Non-edible vegetable oils: A critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2013, **18**, 211–245 [vid. 2017-03-31]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2012.10.013
- [96] ABBASZAADEH, Ahmad, Barat GHOBADIAN, Mohammad Reza OMIDKHAH a Gholamhassan NAJAFI. Current biodiesel production technologies: A comparative review. *Energy Conversion and Management* [online]. 2012, **63**, 138–148 [vid. 2017-03-31]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2012.02.027

- [97] BALAT, Mustafa a Havva BALAT. Progress in biodiesel processing. *Applied Energy* [online]. 2010, **87**(6), 1815–1835 [vid. 2017-03-31]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2010.01.012
- [98] VOJTISEK-LOM, M., M. PECHOUT a M. MAZAC. Measurement of consumption rates of viscous biofuels. *Fuel* [online]. 2013, **107**. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2012.11.025
- [99] RAMADHAS, A.S., C. MURALEEDHARAN a S. JAYARAJ. Performance and emission evaluation of a diesel engine fueled with methyl esters of rubber seed oil. *Renewable Energy* [online]. 2005, **30**(12), 1789–1800 [vid. 2017-03-31]. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2005.01.009
- [100] ONG, Hwai Chyuan, H.H. MASJUKI, T.M.I. MAHLIA, A.S. SILITONGA, W.T. CHONG a K.Y. LEONG. Optimization of biodiesel production and engine performance from high free fatty acid Calophyllum inophyllum oil in CI diesel engine. *Energy Conversion and Management* [online]. 2014, **81**, 30–40 [vid. 2017-03-31]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2014.01.065
- [101] MURILLO, S., J.L. MÍGUEZ, J. PORTEIRO, E. GRANADA a J.C. MORÁN. Performance and exhaust emissions in the use of biodiesel in outboard diesel engines. *Fuel* [online]. 2007, **86**(12), 1765–1771 [vid. 2017-03-31]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2006.11.031
- [102] BOEHMAN, A.L., J. SONG a M. ALAM. Impact of biodiesel blending on diesel soot and the regeneration of particulate filters. *Energy and Fuels* [online]. 2005, **19**(5). Dostupné z: doi:10.1021/ef0500585
- [103] MAGNO, Agnese, Ezio MANCARUSO a Bianca Maria VAGLIECO. Effects of both blended and pure biodiesel on waste heat recovery potentiality and exhaust emissions of a small CI (compression ignition) engine. *Energy* [online]. 2015, **86**, 661–671 [vid. 2017-04-03]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2015.04.092
- [104] MCCORMICK, Bob. Effects of Biodiesel on NO<sub>x</sub> Emissions Advantages of Biodiesel. 2005, (x).

- [105] MURTONEN, T., P. AAKKO-SAKSA, M. KURONEN, S. MIKKONEN a K. LEHTORANTA. Emissions with heavy-duty diesel engines and vehicles using FAME, HVO and GTL fuels with and without DOC+POC aftertreatment. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants* [online]. 2010, **2**(2). Dostupné z: doi:10.4271/2009-01-2693
- [106] ERKKILÄ, K., N.-O. NYLUND, T. HULKKONEN, A. TILLI, S. MIKKONEN, P. SAIKKONEN, R. MÄKINEN a A. AMBERLA. Emission performance of paraffinic HVO diesel fuel in heavy duty vehicles. *SAE Technical Papers* [online]. 2011. Dostupné z: doi:10.4271/2011-01-1966
- [107] HAJBABAEI, Maryam, Kent C. JOHNSON, Robert A. OKAMOTO, Alexander MITCHELL, Marcie PULLMAN a Thomas D. DURBIN. Evaluation of the impacts of biodiesel and second generation biofuels on NO<sub>x</sub> emissions for CARB diesel fuels. *Environmental Science and Technology* [online]. 2012, **46**(16), 9163–9173. ISSN 0013936X. Dostupné z: doi:10.1021/es300739r
- [108] RANTANEN, L., R. LINNAILA, P. AAKKO a T. HARJU. NExBTL - Biodiesel fuel of the second generation. *SAE Technical Papers* [online]. 2005. Dostupné z: doi:10.4271/2005-01-3771
- [109] AATOLA, Hannu, Martti LARMI, Teemu SARJOVAARA a Seppo MIKKONEN. Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel: Trade-off between NO<sub>x</sub>, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy Duty Engine. SAE Technical Paper 2008-01-2500. *SAE Technical Papers* [online]. 2008, (724), 12. ISSN 19463936. Dostupné z: doi:10.4271/2008-01-2500
- [110] MÄKINEN, R., N.-O. NYLUND, K. ERKKILÄ, P. SAIKKONEN a A. AMBERLA. Bus fleet operation on renewable paraffinic diesel fuel. *SAE Technical Papers* [online]. 2011. Dostupné z: doi:10.4271/2011-01-1965
- [111] LAPUERTA, M., O. ARMAS a R. BALLESTEROS. Diesel particulate emissions from biofuels derived from Spanish vegetable oils. *SAE Technical Papers* [online]. 2002. Dostupné z: doi:10.4271/2002-01-1657

- [112] CANAKCI, M a Jh Van GERPEN. Comparison of engine performance and emissions for petroleum diesel fuel, yellow grease biodiesel, and soybean oil biodiesel. *Transactions of the ASAE* [online]. 2003, **46**(4), 937–944. ISSN 0001-2351. Dostupné z: doi:10.13031/2013.13948
- [113] DURBIN, Thomas D., John R. COLLINS, Joseph M. NORBECK a Matthew R. SMITH. Effects of biodiesel, biodiesel blends, and a synthetic diesel on emissions from light heavy-duty diesel vehicles. *Environmental Science and Technology* [online]. 2000, **34**(3), 349–355. ISSN 0013936X. Dostupné z: doi:10.1021/es990543c
- [114] SADEGHINEZHAD, E., S. N. KAZI, Foad SADEGHINEJAD, A. BADARUDIN, Mohammad MEHRALI, Rad SADRI a Mohammad REZA SAFAEI. *A comprehensive literature review of bio-fuel performance in internal combustion engine and relevant costs involvement* [online]. 2014. ISBN 9133413797. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2013.09.022
- [115] TURRIO-BALDASSARRI, Luigi, Chiara L BATTISTELLI, Luigi CONTI, Riccardo CREBELLI, Barbara DE BERARDIS, Anna Laura IAMICELI, Michele GAMBINO a Sabato IANNACCONE. Emission comparison of urban bus engine fueled with diesel oil and ‘biodiesel’ blend. *Science of The Total Environment* [online]. 2004, **327**(1), 147–162 [vid. 2017-04-02]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2003.10.033
- [116] QI, D.H., H. CHEN, L.M. GENG a Y. ZH. BIAN. Experimental studies on the combustion characteristics and performance of a direct injection engine fueled with biodiesel/diesel blends. *Energy Conversion and Management* [online]. 2010, **51**(12), 2985–2992 [vid. 2017-04-02]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2010.06.042
- [117] SZYBIST, James P., Juhun SONG, Mahabubul ALAM a André L. BOEHMAN. Biodiesel combustion, emissions and emission control. *Fuel Processing Technology* [online]. 2007, **88**(7), 679–691 [vid. 2017-08-09]. ISSN 03783820. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuproc.2006.12.008

- [118] SZYBIST, James P., André L. BOEHMAN, Joshua D. TAYLOR a Robert L. MCCORMICK. Evaluation of formulation strategies to eliminate the biodiesel NOx effect. *Fuel Processing Technology* [online]. 2005, **86**(10), 1109–1126 [vid. 2017-08-09]. ISSN 03783820. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuproc.2004.11.006
- [119] QI, D.H., K. YANG, D. ZHANG a B. CHEN. Combustion and emission characteristics of diesel-tung oil-ethanol blended fuels used in a CRDI diesel engine with different injection strategies. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2017, **111**, 927–935 [vid. 2017-06-25]. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.09.157
- [120] LAPUERTA, Magín, Monserrat VILLAJOS, John R. AGUDELO a André L. BOEHMAN. Key properties and blending strategies of hydrotreated vegetable oil as biofuel for diesel engines. *Fuel Processing Technology* [online]. 2011, **92**(12), 2406–2411 [vid. 2017-07-28]. ISSN 03783820. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuproc.2011.09.003
- [121] KOTEK, Martin, Jan HROMADKO, Petr MILER, Tomas KOTEK a Karel PLUHAR. Application of E85 fuel in 1.2 HTP engine. *Listy Cukrovarnické a Reparské*. 2013, **129**(7–8), 258–261.
- [122] HAPPONEN, Matti. *Particle and NO<sub>x</sub> Emissions from a HVO-Fueled Diesel Engine*. nedatováno. ISBN 9789521529214.
- [123] ČEDÍK, J., M. PEXA, M. KOTEK a J. HROMÁDKO. Effect of E85 fuel on performance parameters, fuel consumption and engine efficiency - Škoda Fabia 1.2 HTP. *Agronomy Research*. 2014, **12**(2).
- [124] HEIKKILÄ, Juha, Matti HAPPONEN, Timo MURTONEN, Kalle LEHTO, Teemu SARJOVAARA, Martti LARMI, Jorma KESKINEN a Annele VIRTANEN. Study of Miller timing on exhaust emissions of a hydrotreated vegetable oil (HVO)-fueled diesel engine. *J Air Waste Manag Assoc* [online]. 2012, **62**(11), 1305–1312. ISSN 1096-2247. Dostupné z: doi:10.1080/10962247.2012.708383
- [125] ČEDÍK, J., M. PEXA, M. KOTEK a J. HROMÁDKO. Effect of E85 Fuel on Harmful Emissions - Škoda Fabia 1.2 HTP. *Agronomy Research*. 2014, **12**(2).

- [126] KURONEN, M., S. MIKKONEN, P. AAKKO a T. MURTONEN. Hydrotreated vegetable oil as fuel for heavy duty diesel engines. *SAE Technical Papers* [online]. 2007, **2007-01-40**, 14. Dostupné z: doi:10.4271/2007-01-4031