

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů



**Produkce částic ve vznětových motorech při provozu
na biopaliva**

Diplomová práce

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

Vypracoval: Bc. Radek Vinecký

© 2019 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Radek Vinecký

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Produkce částic ve vznětových motorech při provozu na biopaliva

Název anglicky

Production of particles in a diesel engine operating on biofuels

Cíle práce

Cílem diplomové práce je porovnat tvorbu částic ve vznětových motorech při použití biopaliv. Spalovací motor bude zatěžován v rámci NRSC testu.

Metodika

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu (paliva vznětových motorů, produkce emisí vznětových motorů, metody měření emisí vznětových motorů)
3. Cíl a metodika práce
4. Výsledky (měření produkce částic ve vznětových motorech vybranou metodou při použití různých koncentrací biosložek v motorové naftě, vyhodnocení naměřených dat a porovnání výsledků)
5. Závěr

Doporučený rozsah práce

50-60

Klíčová slova

spalovací motor, biopaliva, kouřivost, produkce částic

Doporučené zdroje informací

DEMIRBAS, Ayhan. Biodiesel: a realistic fuel alternative for diesel engines. London: Springer, c2008. ISBN 9781846289958

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

Normy a předpisy, periodika a firemní literatura

ŠMERDA, Tomáš, Jiří ČUPERA a Martin FAJMAN. *Vznětové motory vozidel: biopaliva, emise, traktory*. Brno: CPress, 2013. Auto-moto-profi (CPress). ISBN 978-80-264-0160-5

VLK, František. *Alternativní pohony motorových vozidel*. Brno: František Vlk, 2004. ISBN 80-239-1602-5

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů

Elektronicky schváleno dne 2. 1. 2017

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 1. 2017

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 04. 03. 2018

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Produkce částic ve vznětových motorech při provozu na biopaliva" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce.

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

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

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

V Praze dne 31.3.2019

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Martinu Pexovi, Ph.D. za odborné a vstřícné vedení, cenné rady a ochotu při tvorbě této diplomové práce. Rovněž bych chtěl poděkovat za pomoc všem zúčastněným během experimentálního měření dat pro tuto diplomovou práci. Velké díky také patří mé rodině a všem nejbližším za umožnění získat vysokoškolské vzdělání, za jejich morální podporu během celého studia a pomoc s korekturou textu této práce.

Souhrn

Tato diplomová práce se zabývá produkcí pevných částic vznětovými motory při provozu na biopaliva. V samostatné kapitole je uvedena rešerše zabývající se popisem nejběžnějších alternativních biopaliv k pohonu vznětových motorů, zaměřená na jejich vlastnosti, výrobu a vliv na jednotlivé složky emisí. Dále jsou v této kapitole popsány tvorba a vlastnosti emisí produkovaných vznětovými motory a také možnosti jejich měření. Experimentální část práce byla provedena s využitím traktoru Zetor Forterra 8644, ve kterém byly spalovány různé směsi řepkového a slunečnicového oleje s motorovou naftou. Motor traktoru byl během měření zatěžován v rámci NRSC zkušebního cyklu, při kterém byla zkoumána produkce pevných částic se zaměřením na jejich koncentraci a velikost. Naměřené výsledky směsných paliv byly porovnány s naměřenými hodnotami pro čistou motorovou naftu bez přidaných biosložek.

Klíčová slova: spalovací motor, vznětový motor, biopaliva, emise, kouřivost, produkce částic

Production of particles in a diesel engine operation on biofuel

Summary

This diploma thesis deals with a production of particulate matter by diesel engines during operation on biofuels. The research is presented in an individual chapter that describes the most common alternative biofuels for diesel engines. That is focused on their properties, production and impact on individual components of emissions. The process of creation and properties of emissions produced by diesel engines as well as the possibilities of their measurement are also described in this chapter. The experimental part of this thesis was realized using a Zetor Forterra 8644 tractor in which various blends of rapeseed and sunflower oil with diesel fuel were burned. The tractor engine was loaded according to the NRSC cycle during the measurement at which particulate matter was analyzed with a focus on their concentration and size. The measured results of mixed fuels were compared with the measured values for a pure diesel without added any bio-components.

Keywords: combustion engine, diesel engine, biofuel, emission, smokiness, production of particles

Obsah

1	Úvod	1
2	Rozbor současného stavu řešené problematiky	2
2.1	Paliva vznětových motorů	2
2.1.1	Motorová nafta.....	4
2.1.2	Bioethanol.....	6
2.1.3	Butanol	10
2.1.4	Methylestery mastných kyselin	13
2.1.5	Čisté rostlinné oleje.....	17
2.2	Emise vznětových motorů	19
2.2.1	Oxid uhelnatý – CO	22
2.2.2	Oxid uhličitý – CO ₂	23
2.2.3	Nespálené uhlovodíky – HC.....	24
2.2.4	Oxidy dusíku – NO _x	24
2.2.5	Pevné částice – PM	25
2.2.6	Oxidy síry – SO _x	27
2.3	Metody měření emisí vznětových motorů	28
2.3.1	Opacimetrie	28
2.3.2	Filtrační metoda	29
2.3.3	Hmotnostní měření koncentrace částic	30
3	Cíl práce a metodika	33
3.1	Cíl práce.....	33
3.2	Metodika.....	33
3.2.1	Metodika měření vnější otáčkové charakteristiky motoru	36
3.2.2	Metodika měření vlivu paliv na produkci pevných částic.....	37
3.2.3	Metodika vyhodnocení naměřených dat zkušebních směsí paliv	39
3.2.4	Použité přístroje a zařízení	40
4	Výsledky	43
4.1	Výsledky měření vnější otáčkové charakteristiky motoru	43
4.2	Výsledky měření vlivu paliv na produkci pevných částic	48
4.3	Porovnání a vyhodnocení naměřených hodnot.....	55
5	Závěr	60
6	Seznam použitých zdrojů	62
7	Seznam obrázků.....	68
8	Seznam tabulek	69

1 Úvod

Život bez automobilu si v dnešním moderním světě dokáže představit již málokdo a automobil se tak stává samozřejmostí téměř každého z nás, což také vyplývá ze stále většího počtu vozidel v centrálním registru vozidel spravovaným ministerstvem dopravy České republiky. To však má za následek zvýšenou spotřebu dnes běžně používaných fosilních pohonných hmot a tím také rostoucí produkci emisí negativně ovlivňující ovzduší a životní prostředí kolem nás.

V současné době jsou stále nejpoužívanějšími palivy spalovacích motorů vozidel benzín a motorová nafta, které jsou vyráběné z ropy. Zásoba ropy není nekonečná, její množství se velmi rychle snižuje a zdroj není možné nijak obnovit. To vedlo odborníky k hledání jiného zdroje energie k pohonu vozidel, který by zajistil nezávislost populace na ropě a snížil by také negativní dopady na planetu Zemi používáním paliv ropného původu. Přechod na spalování alternativních paliv je jedním z mnohých řešení, jak tohoto cíle dosáhnout. Při výzkumu alternativních paliv musí být brány v úvahu jeho výrobní náklady, aby bylo palivo cenově konkurenceschopné. Dále musí být vyrobené z obnovitelného zdroje energie s dostatečným množstvím vstupních surovin, který zároveň nesmí být zdrojem do potravinářského průmyslu a mít co nejmenší vliv na životní prostředí., což splňují zejména paliva vyrobená z biomasy, tedy tzv. biopaliva. K zamyšlení je, zda v současné době jsme nebo zda v budoucnu budeme schopni pokrýt spotřebu vozidel alternativními palivy, až se zásoby „černého zlata“ vyčerpají.

Vývoj biopaliv pro vznětové motory se zabývá zejména produkty na bázi rostlinných olejů a živočišných tuků. V České republice je nejrozšířenějším typem olej vyrobený z řepky olejky. Ve velké míře se také využívá slunečnicový olej. Tyto oleje mohou být jako paliva použity v čisté formě nebo jsou jejich fyzikální, chemické a palivářské vlastnosti transesterifikací přizpůsobeny blíže k vlastnostem fosilní motorové nafty. Pro spalování čistých rostlinných olejů jako samostatného paliva je kvůli jeho odlišným vlastnostem nutná nákladná úprava palivového systému. Rostlinné oleje mohou být také spalovány ve směsi s motorovou naftou bez jakýchkoliv úprav palivové soustavy nebo konstrukce motoru.

Ochrana životního prostředí by při vývoji alternativních paliv měla být nejdůležitějším aspektem. V případě vznětových motorů jsou nejsledovanějšími složkami emisí pevné částice, jejichž produkcí se tato diplomová práce také zabývá.

2 Rozbor současného stavu řešené problematiky

Rozbor současného stavu řešené problematiky je rozčleněn do třech samostatných podkapitol. První podkapitola popisuje jednotlivá paliva, která mohou být využita k pohonu vznětových motorů, jejich vlastnosti, výrobu a vliv na pevné částice. Druhá podkapitola se věnuje popisu jednotlivých emisí, které jsou produkovány vznětovými motory, jejich tvorbě a škodlivosti pro lidský organismus. V poslední podkapitole jsou popsány různé typy měření emisí vznětových motorů pro homologaci vozidel nebo emisní kontrolu na stanicích měření emisí.

2.1 Paliva vznětových motorů

Palivem jsou nazývané takové chemické látky, které současně splňují tři „e“ kritéria: energetické, ekologické a ekonomické. Všeobecně jsou automobilovými palivy takové látky organického nebo anorganického původu, které při svém spalování vyvíjí velké množství tepla. Vzniklé teplo se dále přeměnou na mechanickou práci využívá k pohonu pístu spalovacího motoru. Paliva s nejvyšší tepelnou energií, vztažené na jednotku objemu, jsou paliva kapalná, kterými se také tato diplomová práce zabývá. Nejrozšířenějším palivem pro vznětové motory je v současné době stále motorová nafta. [1], [2]

„Podle zdroje, ze kterého jsou získávány, je možné paliva pro pístové spalovací motory rozdělit na:

- *fosilní uhlovodíková paliva (získávána převážně z ropy)*
 - *kapalná: nafta, benzín, petrolej*
 - *plynná: propan – butan, zemní plyn*
- *paliva získávána zpracováním biomasy*
 - *bioethanol*
 - *rostlinné oleje a jejich estery*
 - *bioplyn*
- *vodík „[1]“*

Biopaliva se však v současné době postupně stávají nedílnou součástí běžného života. Jedná se o palivo z obnovitelných zdrojů energie, které je děleno do tří generací podle vstupní suroviny pro jejich výrobu. Již řadu let jsou bioethanol a methylestery mastných

kyselin v omezeném množství přimíchávány do produkčních benzínů a motorových naft, proto také došlo od 12. října 2018 v rámci celé Evropské Unie ke změně názvů těchto paliv. Nový název E5 představuje možnost příměsi až 5 % bioethanolu do benzínu a B7 umožňuje přimíchat až 7 % biosložky do motorové nafty. Tato změna přichází se silicím tlakem nahradit fosilní paliva biosložkami, a to i přes značné problémy spojené s vysokými výrobními náklady, technickými a logistickými problémy. V dnešní době se nejvíce využívají biopaliva 1. generace a jen v omezené míře biopaliva generace druhé. [3], [4]

Biopaliva 1. generace jsou kapalné nebo plynné látky, které jsou vyráběny ze surovin biologického původu obsahující jednoduché cukry nebo látky, které lze snadno na jednoduché cukry přeměnit, jako je například škrob. Jsou to ovšem také suroviny, ze kterých je možné získat rostlinný olej nebo živočišný tuk. Jedná se o suroviny, které mohou být využity k jiným účelům, zejména jako potraviny pro člověka. Výroba biopaliv 1. generace má za následek nepříznivé zvyšování cen potravin. Při výrobě a spalování biopaliv vzniká oxid uhličitý. Pěstováním plodin k jejich výrobě se oxid uhličitý zpětně spotřebovává. Používáním biopaliv 1. generace se tak dosahuje poklesu CO₂ až o 50 %, jak je patrné z obrázku číslo 1. [1], [2], [5]

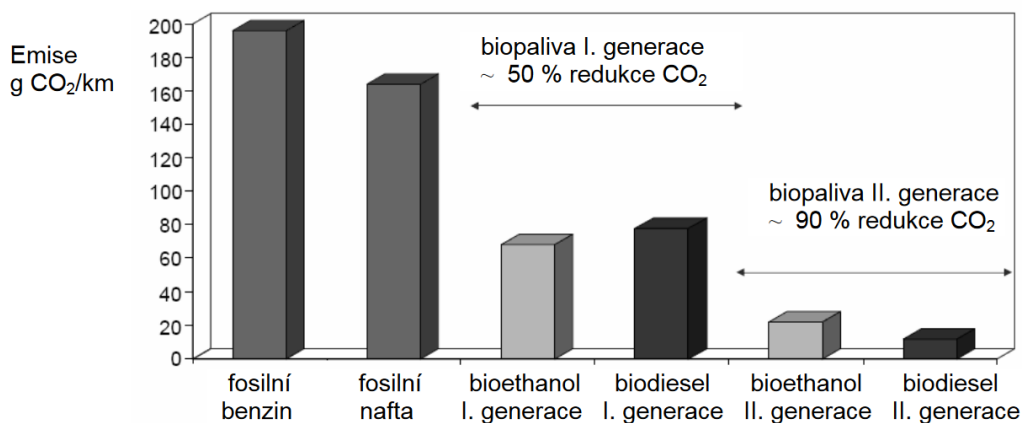
„Látky považované směrnicí 2003/30/ES za biopalivo jsou:

- *bioethanol je ethanol vyrobený z biomasy nebo biologického rozkladu odpadů;*
- *bionafta je methylester vyrobený z rostlinného nebo živočišného oleje;*
- *bioplyn je plynná pohonná hmota vyrobená z biomasy nebo biologického rozkladu odpadů, která může být vyčištěna až na kvalitu zemního plynu a užívaná jako biopalivo nebo dřevoplyn;*
- *biomethanol je methanol vyroben z biomasy;*
- *biodimethylether je dimehtylether vyroben z biomasy.“ [2]*

Biopaliva 2. generace jsou na rozdíl od biopaliv 1. generace vyráběna ze surovin nepotravinářského původu. Jde především o lignocelulózové materiály, jako jsou dřevo, dřevní štěpka, dřevní odpad, ale také seno, sláma, rychle rostoucí traviny, použitý papír nebo biologický odpad. Zpracování těchto materiálů pro výrobu paliva je ovšem výrazně technologicky a finančně nákladnější. Největší problém představuje nákladná přeměna celulózy na jednoduše zkvasitelné sacharidy metodou zvaná hydrolýza. Což je hlavním důvodem, proč se do současné doby biopaliva druhé generace výrazněji komerčně

neprosadila. Pokles produkce CO₂ se podle obrázku číslo 1 u takto vyrobených paliv odhaduje až o 90 % v porovnání s fosilními druhy motorových paliv. Nejvýznamnějšími biopalivy 2. generace jsou bioethanol a syntetická motorová nafta. Mezi tato paliva dále patří například i biobutanol. [2], [3], [6], [7]

Obrázek 1: Potenciální pokles produkce emisí CO₂ biopalivy 1. a 2. generace



Zdroj: [6]

Biopaliva 3. generace využívají ke své výrobě mikroby, které žijí nebo mohou být uměle pěstovány na plochách nevhodných pro pěstování potravinářských plodin. Jedná se o relativně novou technologii výroby biopaliv z řas, které mohou produkovat obnovitelnou energii a současně vstřebávat oxid uhličitý, což pro vědce znamená velkou příležitost. Biopaliva vyrobená z řas by mohla mít v budoucnu srovnatelné vlastnosti jako mají fosilní uhlovodíková paliva. Řasy jsou geneticky modifikovány tak, aby oxid uhličitý přeměňovaly na uhlovodíky a produkovaly tak ropu. Ta by byla dále zpracovávána ve stávajících rafineriích na benzin, naftu a letecké palivo. Potencionální výnosnost biopaliva z jednoho hektaru představuje u řas přibližně stonásobek v porovnání s produkcí z kukuřice, sóje nebo cukrové třtiny. V konkrétních číslech to je 66 000 až 94 000 l.ha⁻¹, zatímco řepka olejka dosahuje výnosnosti jen 1 200 l.ha⁻¹. [8]

2.1.1 Motorová nafta

V dnešní době je motorová nafta stále nejčastěji využívaným palivem pro vznětové motory používané převážně v průmyslu a zemědělství pro pohon mobilních a stacionárních strojů. Jedná se o směs kapalných uhlovodíků fosilního původu s 10 až 22 uhlíky v řetězci. Motorová nafta se vyrábí mísením dvou destilačních produktů z ropy. Konkrétně se jedná o petrolej a plynový olej. Procentuální zastoupení jednotlivých látek je závislé na teplotě

bodů vzplanutí motorové nafty (zajištěnou přítomností lehkých složek) a vzniku úsad ve spalovacím prostoru (omezující maximální podíl těžkých složek). Teplota varu se nachází v teplotním rozmezí 150 až 360 °C. [1], [2], [9]

V České republice jsou u čerpacích stanic k dispozici motorové nafty určené pro použití v mírném klimatu. Na jejich kvalitu a technické požadavky se vztahuje norma ČSN EN 590. Rozhodujícím faktorem kvality a použitelnosti motorové nafty při snížené teplotě je filtrovatelnost (neboli teplota vylučování parafinů). Norma rozděluje dodávané motorové nafty do několika tříd podle časových úseků. Jedná se o zimní naftu s označením F dodávanou v období od 16. listopadu do 28. února, kdy je její filtrovatelnost zaručena až do teploty -20 °C. Letní nafta pod označením B se dodává v období od 15. dubna do 30. září s filtrovatelností do teploty 0 °C. Ve zbylém období se distribuuje přechodová nafta s označením D s filtrovatelností do teploty -10 °C. [1], [2]

Zákon č. 86/2002 Sb., O ochraně ovzduší v platném znění stanovuje minimální podíl biosložek z celkového množství motorové nafty dodané na trh. Biosložky mohou být použity samostatně nebo jako příměs do běžné motorové nafty. Minimální podíl biosložek se postupně zvyšoval až na současných 6 % objemových dodávaného paliva na trh. Norma ČSN EN 590 proto stanovuje maximální povolenou příměs biosložky do běžné motorové nafty na hodnotu 7 % objemových, aby nedocházelo k prodeji motorové nafty s velkým obsahem biosložky. Takové palivo by u běžných vznětových motorů bez dodatečných úprav mohlo způsobit jeho poškození. [2], [5]

Cetanové číslo

Cetanové číslo motorové nafty udává vznětlivost paliva neboli jeho reaktivitu. Jedná se o dobu, která je zapotřebí k dosažení maximálního tlaku ve válci motoru po vznícení paliva od jeho vstříku do spalovacího prostoru motoru. [2]

Cetanové číslo je stanoveno laboratorní zkouškou, při které je použitý stejný jednoválcový motor s proměnným kompresním poměrem a hlavou pro přímý vstřík paliva jako pro stanovení oktánového čísla benzínu. Hodnota cetanového čísla zkoušené motorové nafty odpovídá objemovému podílu cetanu ve směsi dvou látek, která má stejně dlouhou prodlevu vznícení. Cetan charakterizuje látku s velmi krátkou prodlevou vznícení s cetanovým číslem 100. Alfamethylnaftalen charakterizuje látku s velmi dlouhou prodlevou vznícení s cetanovým číslem 0. Motorové nafty dodávané na světový trh mají hodnotu

cetanového čísla 50 ± 5 . Palivo s příliš vysokým nebo s příliš nízkým cetanovým číslem není vhodné pro vznětové motory vozidel. [1], [2]

Nízká hodnota cetanového čísla se projeví dlouhou prodlevou vznícení paliva. Dochází ke vznícení velkého množství paliva současně a tím k prudkému nárůstu tlaku ve spalovacím prostoru. To má za následek tzv. „tvrdý chod“ motoru, který doprovází zvýšený hluk. Negativní vliv nízkého cetanového čísla se může projevit i při studeném spouštění motoru. V motoru se nedosáhne potřebné teploty k prohoření celé směsi paliva, což vede ke zvýšeným emisím. Jedná se o zvýšený obsah oxidu uhelnatého (CO) a nespálených nebo částečně zoxidovaných uhlovodíků ve výfukových plynech. To se projevuje bílým kouřem z výfuku vozidla. [2]

Vysoká hodnota cetanového čísla je charakteristická krátkou prodlevou vznícení paliva. Ke vznícení paliva dochází příliš blízko vstřikovací trysce. Palivo není dostatečně smíseno se vzduchem a dochází tak k nedokonalému spalování se zvýšenou tvorbou sací. Hoření v blízkosti vstřikovací trysky způsobuje vznik karbonových úsad v otvorech trysky nebo zadření jehly. [2]

2.1.2 Bioethanol

Bioethanol lze označit jako nejstarší biopalivo. Jedná se o druhý nejnižší alkohol čiré barvy s charakteristickým alkoholovým zápachem. Získáván je alkoholovým kvašením zemědělských surovin obsahující jednoduché sacharidy nebo látky, které lze v sacharidy přeměnit, jako jsou škrob nebo celulóza. [2], [6]

„Biomasa sloužící k výrobě bioethanolu lze rozdělit do tří skupin:

- *biomasa obsahující jednoduché cukry (cukrová řepa a cukrová třtina),*
- *biomasa obsahující škrob (obiloviny, brambory, kukuřice),*
- *lignocelulózová biomasa (sláma, rychle rostoucí dřeviny, štěpky, odpad biologického původu, papír apod.).“ [6]*

V dnešní době se k výrobě bioethanolu používají jen suroviny obsahující sacharidy a škrob. V USA se ve velké míře využívá kukuřice a v Brazílii cukrová třtina. V České republice se k jeho výrobě používá obilí a cukrová řepa. Tyto suroviny by ovšem mohly být lépe využity jako potraviny pro člověka, proto je bioethanol vyrobený z těchto surovin

považován za biopalivo první generace. V budoucnu se předpokládá výroba z lignocelulóзовé biomasy, které je na naší planetě dostatek a představuje perspektivnější zdroj pro jeho výrobu. Takto vyrobený bioethanol je považován za biopalivo druhé generace. [6]

Bioethanol je hyroskopický (váže na sebe vzdušnou vlhkost), tím dochází ke korozi palivového systému a při použití směsného paliva k separaci jednotlivých složek a degradaci paliva. Separace jednotlivých složek je poměrně rychlá. Ve směsi E30D70 dochází k separaci složek již po 5 minutách, ve směsi E10D90 po 72 hodinách. Přidáním butanolu separace nastává po 11 až 14 dnech. Využití bioethanolu ve vznětových motorech není příliš vhodné. Jeho nevýhodou je nízké cetanové číslo o hodnotě 8, kinematická viskozita a nízká výhřevnost. Provoz vznětového motoru na bioethanol je možný pouze po přidání aditiv na bázi nitridů, které zlepšují vznětlivost, mísitelnost, korozní a mazací vlastnosti. Při použití čistého bioethanolu je zapotřebí vznětový motor vybavit pomocným zapalovacím systémem, zvýšit kompresní poměr na 23 nebo vyšší a zvětšit dávku paliva. Ve směsi s motorovou naftou není zapotřebí žádných úprav motoru. Směsné palivo má příznivější složení emisí NO_x , minimální emise síry a neprodukuje téměř žádné pevné částice. Emise oxidu dusného (CO) a nespálených uhlovodíků (C_xH_x) jsou však vyšší. Větší uplatnění je ovšem u zážehových motorů jako palivo E85 (85 % bioethanol, zbytek je benzín). Jeho výhodou je vysoké octanové číslo s hodnotou 107. Provoz vozidla na toto palivo ovšem vyžaduje úpravu systému tvorby směsi, především zvětšení dávky paliva. [1], [5], [6], [9], [10]

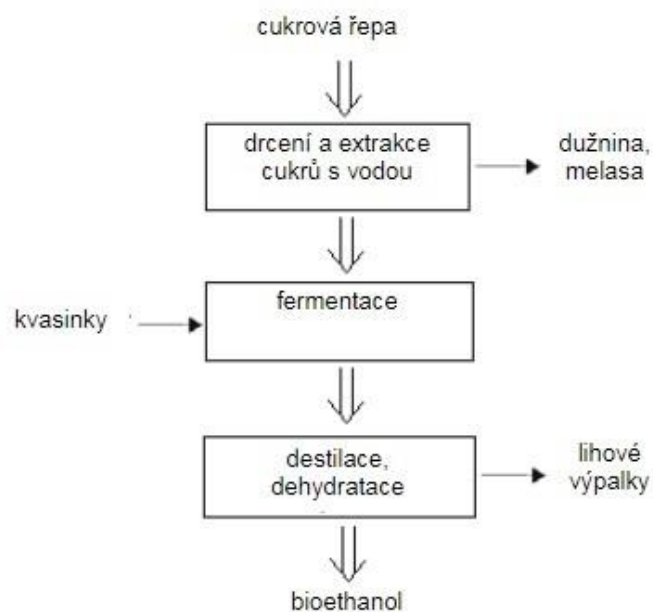
Výroba bioethanolu ze surovin obsahující jednoduché sacharidy

Nejjednodušší výroba bioethanolu je z cukrové třtiny a řepy, které obsahují sacharózu. Cukrová třtina nebo řepa je rozřezána na sladké řízky a přidáním vody je z nich extrahován cukr. Tento princip je popsán rovnicí 1. Extrakce trvá 120 minut a teplota vody nesmí přesáhnout 80 °C. Odpadem ze zpracování jsou vyslazené řízky, které dále slouží jako krmivo pro hospodářská zvířata. Následně je roztok přidáním pivních kvasinek (*Saccharomyces cerevisiae*) fermentován 24 až 36 hodin podle rovnice 2, při dodržení vhodného pH (4 až 6) a okolní teploty 27 až 32 °C. Fermentace probíhá bez přístupu vzduchu. Při procesu vzniká tzv. kvasící zápara (velmi zředěný vodní roztok bioethanolu a dalších alkoholů), kdy jsou jednoduché cukry přeměněny na bioethanol a oxid uhličitý. Hraniční koncentrace bioethanolu v kvasící zápare je 12 až 13 % objemových. [6], [11]



Poté je roztok destilován, kde je bioethanol oddělen od destilačního zbytku, kterým jsou lihové výpalky. Ty dále slouží k výrobě krmných směsí. Následnou rafinací je bioethanol zbaven vedlejších produktů fermentace. Výsledkem je azeotropní roztok (směs s konstantním bodem varu), který je tvořen z 95,57 % hmotnostních bioethanolem. Zbytek je voda, kterou již destilací nelze oddělit. K získání čistého bioethanolu, který lze použít jako palivo ve spalovacích motorech je potřeba použít dalších metod k odvodnění vyrobeného paliva. Nejčastěji se využívá metoda molekulárního síta, při které je získáván bioethanol o koncentraci 99,9 % hmotnostních. Celý postup výroby bioethanolu z cukrové třtiny a řepy je schematicky znázorněn na obrázku číslo 2. [2], [6]

Obrázek 2: Výroba bioethanolu z biomasy obsahující jednoduché sacharidy



Zdroj: [6]

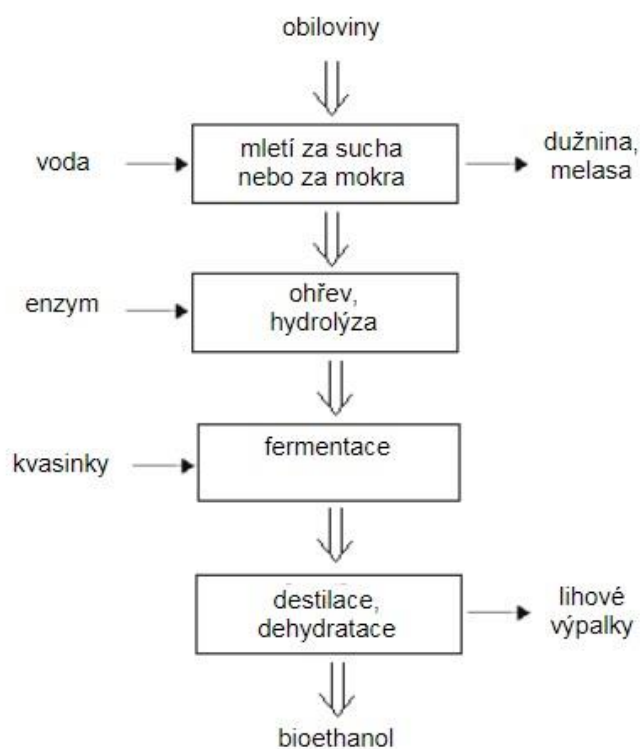
Výroba bioethanolu ze surovin obsahující škrob

Tato podkapitola popisuje výrobu bioethanolu z obilí, která je o něco složitější než výroba ze surovin obsahující jednoduché sacharidy. Obilné zrno je mechanicky rozdrceno nebo rozemleto za mokra nebo sucha pro snadnější působení komplexu enzymů. Po odloučení odpadu v podobě slupek a stébel se zrna zahřejí, čímž dochází k jejich bobtnání

a zmazovatění. Škrob je působením enzymů nebo kyselou hydrolyzou přeměněn na sacharid. Tento proces je popsán rovnicí 3. Následná fermentace probíhá za podobných podmínek jako při výrobě bioethanolu ze surovin obsahující jednoduché sacharidy. Konečná destilace a rafinace jsou shodné s postupem uvedeným v kapitole 3.2.1. Celý postup výroby bioethanolu ze surovin obsahující škrob je schematicky znázorněn na obrázku číslo 3. [6]



Obrázek 3: Výroba bioethanolu z biomasy obsahující škrob



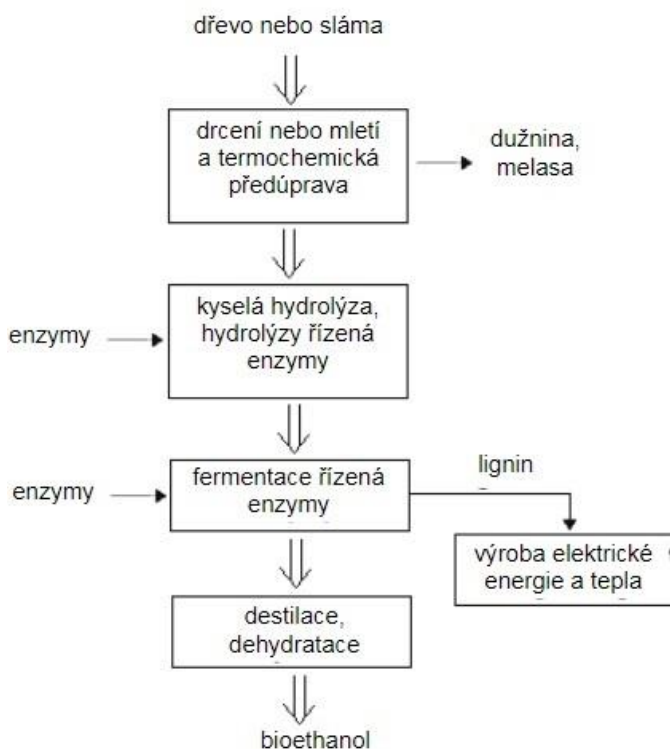
Zdroj: [6]

Výroba bioethanolu ze surovin obsahující lignocelulózu

Výroba bioethanolu ze surovin obsahující lignocelulózu je nejsložitější technologický proces. V dnešní době je tato metoda využívána pouze v rámci výzkumné činnosti, ale pro komerční využití zatím není aplikována. Vstupní surovinou jsou obvykle zemědělské přebytky jako sláma, řepné řízky, různé zbytky biologického původu, dále pak dřevní štěpka, kůra, piliny nebo papír. Proces výroby bioethanolu ze surovin obsahující lignocelulózu je téměř shodný s procesem výroby ze surovin obsahující škrob. Přeměna lignocelulózy na jednoduché sacharidy je ovšem mnohem komplikovanější než přeměna škrobu.

Nejvýhodnějším procesem je kyselá hydrolyza nebo hydrolyza pomocí enzymů. Celý postup výroby bioethanolu ze surovin obsahující lignocelulózu je schematicky znázorněn na obrázku číslo 4. [6], [12]

Obrázek 4: Výroba bioethanolu z biomasy obsahující lignocelulózu



Zdroj: [12]

2.1.3 Butanol

Butanol je alkohol se čtyřmi uhlíky v řetězci, čemuž odpovídá i chemický vzorec C_4H_9OH . Jeho struktura může být s přímým nebo rozvětveným řetězcem. Jelikož mají různé řetězce odlišné vlastnosti, proto se tato práce zabývá pouze s 1-butanolem s přímým řetězcem se skupinou $-OH$ na posledním uhlíku. Butanol se nejlépe hodí k použití jako kapalné palivo nebo přísada pro jiné palivo. Projevuje se vyšší energetickou hustotou a přibližně o 30 % vyšší výhřevností, než má bioethanol. Fyzikálně-chemickými vlastnostmi se podobá benzínu a představuje tak mnohem lepší alternativu k fosilním motorovým palivům než bioethanol. Srovnání parametrů benzínu, nafty, bioethanolu a butanolu jsou uvedené v tabulce číslo 1. [3], [13], [14]

Tabulka 1: Srovnání vybraných parametrů benzínu, nafty, bioethanolu a biobutanolu

Parametr	Natural 95	Nafta	Bioethanol	Biobutanol (1-butanol)
Bod varu [°C]	30 – 215	180 – 370	78	117
Hustota při 20 °C [kg.m ⁻³]	720 – 780	820 – 860	790	808
Kinematická viskozita [mm ² .s ⁻¹]	0,4 – 0,8	1,9 – 4,1	1,52	3,64
Výhřevnost [MJ.kg ⁻¹]	42,7	42,5	26,8	33,1
Stechiometrický poměr	14,7	14,3	9,02	11,21
Octanové číslo	95	20 – 30	108	96
Cetanové číslo	0-10	40 – 50	8	25
Obsah kyslíku [% hm.]	-	-	34,8	21,6

Zdroj: [15]

Butanol je možné míchat s běžnými motorovými palivy ve velkém spektru poměrů. V porovnání s fosilními palivy se během spalování produkuje mnohem méně škodlivých emisí SO_x, NO_x, a CO. Vědecké práce zjistili nižší produkci pevných částic při spalování palivových směsí s obsahem butanolu. Není tak hydrofobní jako bioethanol, tím méně napadá palivový systém motoru korozi. Kvůli vyššímu počtu uhlíků v řetězci stoupá viskozita, mazací schopnost a mísitelnost s jinými palivy, ale naopak klesá těkavost alkoholů, tím má butanol vyšší teplotu varu a menší tendenci se odpařovat. To vede ke snížení teploty spalování a tím i ke snížení emisí NO_x. Z hlediska manipulace je bezpečnější než benzín nebo bioethanol. Lze dopravovat a distribuovat běžnými produktovody, cisternami a může být prodáván u běžných čerpacích stanic. Jeho nevýhodou je zvýšená spotřeba paliva oproti fosilním palivům. Ve srovnání s bioethanolem je spotřeba butanolu nižší, ale produkce bioethanolu v procesu fermentování je 10 až 30krát vyšší. Další nevýhodou je vysoká hodnota viskozity butanolu v porovnání s bioethanolem a fosilními palivy. To představuje problém hlavně v zimním období u směsných paliv s obsahem butanolu nad 10 %, kdy se zvětší odpor proti čerpání paliva a zhorší doprava palivovým systémem. [3], [14], [15], [16]

Butanol lze vyrábět dvěma základními metodami. V dnešní době je nejvíce rozšířenou metodou výroba petrochemickou reakcí z ropy. Takové palivo je poté nazýváno jako petro-butanol, které je vyráběno propylenovou hydroformylací. Náklady na jeho výrobu se odvíjejí od ceny propylenu na trhu, který je silně spojen s cenou ropy. Stále je však tato metoda závislá na ropě, proto není úplně vhodná k výrobě butanolu jako alternativního

paliva. Druhou metodou, v dnešní době často vědecky zkoumanou, je výroba fermentací přímo z kvasitelných jednoduchých cukrů z biomasy. Jedná se především o ABE fermentaci, kdy při kvašení vznikají látky aceton, butanol a ethanol, z čeho je odvozený i název této metody. ABE fermentace je, s přihlédnutím na téma této diplomové práce, vhodnější metodou výroby butanolu jako alternativního paliva. Takové palivo se může označovat jako biobutanol. Obě paliva ovšem mají stejné chemické vlastnosti. [3], [13], [14]

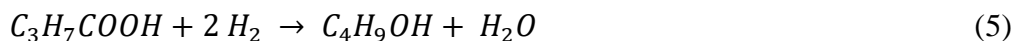
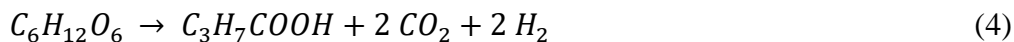
Metoda výroby biobutanolu pomocí ABE fermentace byla poprvé použita v roce 1912 ve Velké Británii. Vstupní suroviny pro výrobu biobutanolu jsou podobné jako při výrobě bioethanolu. Využívají se například cukrová třtina, cukrová řepa, kukuřice nebo pšenice. Rozdíl je v přidávaných mikroorganismech, kdy se ke kvašení využívají jiné kvasinky než při výrobě bioethanolu, konkrétně se jedná o druh *Clostridium acetobutylicum*. Výnos biobutanolu původním postupem ABE fermentace je velmi nízký, přibližně 15 %, v určitých případech byl maximální výnos 25 %. Vyššího výnosu není za použití těchto kvasinek možné dosáhnout, jelikož butanol zastavuje růst a funkci kvasinek a celý proces kvašení již při koncentraci 1,5 až 2 % butanolu v roztoku. Z tohoto důvodu se musí butanol kontinuálně odčerpávat, aby nedošlo k překročení jeho koncentrace nad 1,3 %. Při výrobě bioethanolu tento problém nastává až při koncentracích nad 15 %. [3], [13], [14]

Vědeckým výzkumem byly časem objeveny nové druhy mikroorganismů, které jsou vhodnější pro fermentaci butanolu z organických látek. Tyto mikroorganismy mohou působit při vyšší koncentraci butanolu v roztoku, maximalizují jeho výnos a snižují tvorbu nežádoucích látek jako je kyselina mléčná a propionová, aceton, isopropanol, ethanol a další. [3], [13]

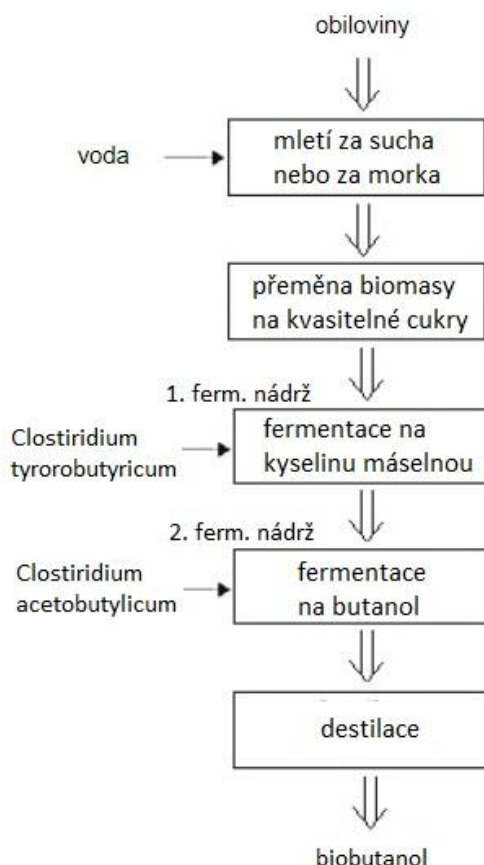
„Jedná se o zcela nové mikroorganismy Clostridium tyrobutyricum a nově vyšlechtěný druh Clostridium acetobutylicum, které v návaznosti na sebe zajišťují optimální produkci butanolu 4,64 g/L/h a výtěžnost z glukózy 42 – 45 %.“ [3]

Fermentace tak probíhá ve dvou stupních. V první fermentační nádrži dochází k přeměně glukózy na kyseliny máselné, kdy se také produkuje oxid uhličitý a vodík. Tento stupeň kvašení se řídí podle rovnice 4. Poté se ve druhé fermentační nádrži přeměňují kyseliny na butanol a tento proces se řídí podle rovnice 5. Kvašením vzniká butanol s přibližně 10% obsahem vody, která je z něj odstraněna následnou destilací. Celý postup

výroby biobutanolu pomocí ABE fermentace s modifikovanými mikroorganismy je schematicky znázorněn na obrázku číslo 5. [3], [13]



Obrázek 5: Výroba biobutanolu z biomasy modifikovanou ABE fermentací



Zdroj: [13]

2.1.4 Methylestery mastných kyselin

Methylestery mastných kyselin, v angličtině označované jako FAME (Fatty Acid Methyl Ester), je biopalivo, které lze použít pouze ve vznětových motorech. Existuje celá řada methylesterů lišící se použitou vstupní surovinou při jejich výrobě. FAME může být vyráběn z rostlinných olejů, živočišných tuků nebo použitých fritovacích olejů. Rostlinné oleje jsou získávány z olejnatých rostlin jako jsou sója, řepka olejka nebo slunečnice.

Živočišné tuky se získávají například z hovězího loje, drůbežího nebo vepřového sádla nebo rybího tuku. [17], [18], [19]

„Běžně používané druhy bionafty a jejich zkrácené označení:

- *RME (Raps-Methyl-Ester) methylester řepkového oleje MEŘO,*
- *SME (Sunflower-Methyl-Ester) methylester slunečnicového oleje,*
- *SOME (Soya-Methyl-Ester) methylester ze sójových bobů,*
- *FAME (Falty-Acid-Methyl-Ester) methylester z živočišných tuků,*
- *VUOME (Vaste-Used-Oil-Methyl-Ester) methylester z použitých fritovacích olejů.“ [6]*

Z vědeckých výzkumů je zřejmé, že během provozu vznětového motoru na čistý methylester mastných kyselin nebo jeho směs s běžnou motorovou naftou byl v porovnání s provozem motoru na čistou motorovou naftu zaznamenán pokles koncentrace pevných částic ve výfukových plynech. Důvodem je obsah kyslíku v methylesteru mastných kyselin, který napomáhá procesu oxidace sazí. Pokles produkce pevných byl výraznější se zvyšujícím se obsahem methylesteru mastných kyselin. [20]

V České republice a celé Evropě je nejvíce rozšířeným druhem methylester řepkového oleje (RME), v češtině označovaný jako MEŘO, který má potenciální šanci nahradit běžnou motorovou naftu. Proto jsou také methylestery mastných kyselin často nazývané jako bionafta. Výroba methylesteru z řepkového oleje představuje přibližně 80 % světové produkce všech druhů bionafty. Methylester řepkového oleje má velmi podobné palivářské vlastnosti jako motorová nafta, které jsou uvedeny v tabulce 2. Ve vznětovém motoru ho lze používat i bez jeho úprav, buď v čisté formě nebo ve směsi s běžnou motorovou naftou. Hodnoty pro methylester řepkového oleje předepisuje norma ČSN EN 14 214. V České republice se MEŘO používá jako příměs do běžné motorové nafty (max. 7 %), jako náhrada běžné motorové nafty nebo jako složka v ekologickém směsném palivu s obsahem bionafty nad 30 % hmotnostních. Pro směsné palivo vyráběné smíšením běžné motorové nafty, methylesteru řepkového oleje (nad 30 %) s různými aditivami jsou parametry kvality určovány normou ČSN 65 6508. [6], [18], [21]

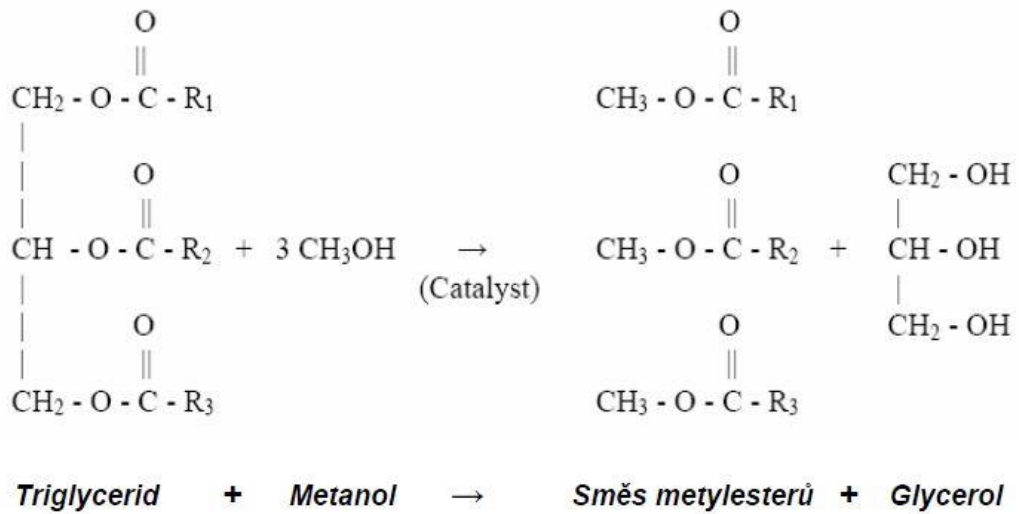
Tabulka 2: Srovnání vybraných parametrů mot. nafty, MEŘO a řepkového oleje

Parametr		Motorová nafta	MEŘO	Řepkový olej
kinematická viskozita [$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]	-25 °C	5 – 30		300
	0 °C	3 – 14	10	180 – 220
	20 °C	2 – 8	6,3 – 8,1	65 – 100
	100 °C	0,7 – 2	1,7	6 – 8
výhřevnost hmotnostní [$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]		42,5	37,1 – 40,7	37,4
výhřevnost objemová [$\text{MJ} \cdot \text{l}^{-1}$]		35,2	32,7	34,4
cetanové číslo		45	54 – 55	35 – 50
měrná hmotnost [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]		0,8 – 0,86	0,87 – 0,88	0,91 – 0,94
bod vzplanutí [°C]		min. 55	130	300 – 330
bod tuhnutí [°C]		-12 – 0	-7	-18 – 0
molekulová hmotnost		200	850 – 900	300

Zdroj: [6]

Výroba methylesteru řepkového oleje začíná smícháním vhodného katalyzátoru s metanolem v uzavřeném reaktoru. Použitým katalyzátorem je obvykle hydroxid sodný nebo draselný, který se přidává z důvodu provádění transesterifikační reakce za nízkých teplot a tlaků, a k dosažení přímé a dostatečně vysoké přeměny (až 98 %) při relativně krátkých časech. Po přidání čistého řepkového oleje do reaktoru začíná proces transesterifikace. U řepkového oleje je zapotřebí kontrolovat obsah vody a volných mastných kyselin. Jejich větší množství způsobuje nežádoucí tvorbu mýdel a mohou také nastat problémy při oddělování glycerolu od reakční směsi. Při transesterifikaci se přeměňují triglyceridy, obsažené v řepkovém oleji, na methylestery a glycerin v poměru 10:1. Jedná se o vratnou reakci. Aby byly přeměněny téměř všechny triglyceridy na methylestery, používá se přebytek metanolu v molárním poměru 4–20:1. Množství použitého katalyzátoru je 0,3-1,5 % hmotnosti řepkového oleje. Transesterifikace se obvykle provádí při teplotách 50-80 °C po dobu jedné až 8 hodin. Proces transesterifikace je popsán rovnicemi na obrázku číslo 6. [6], [18], [22]

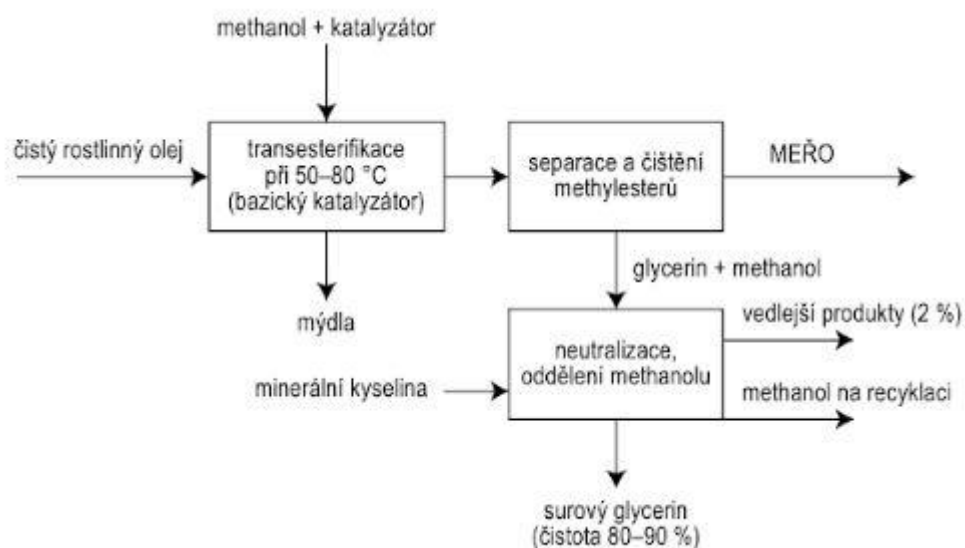
Obrázek 6: Základní reakční schéma transesterifikace triglyceridů



Zdroj: [18]

Následně je od methylesterů oddělen glycerol a obě složky se musejí zneutralizovat přidáním minerální kyseliny, která zneutralizuje účinek katalyzátoru a rozštěpí vzniklá mýdla. Následnou destilací jsou methylestery i glycerin zbaveny přebytečného metanolu, který se recykluje. Vzniklá bionafta se dále promývá teplou vodou k odstranění zbytků katalyzátoru a mýdel, kterých je třeba se na závěr zbavit. Celý postup výroby methylesteru řepkového oleje je schematicky znázorněn na obrázku číslo 7. [6], [18]

Obrázek 7: Výroba methylesteru řepkového oleje



Zdroj: [6]

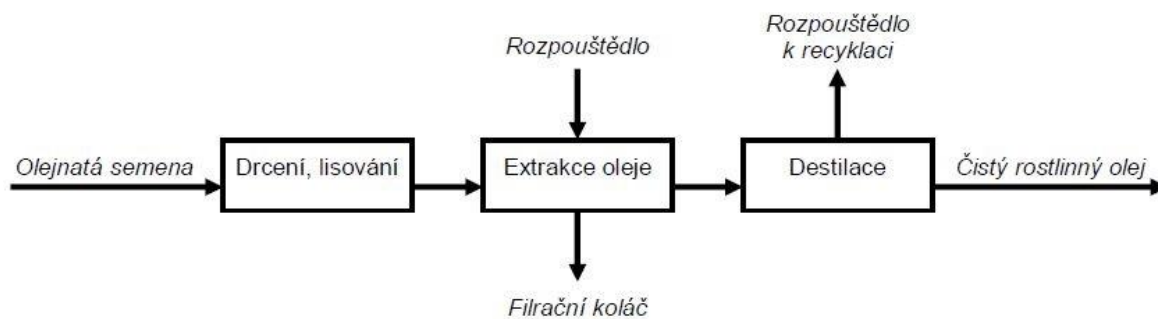
2.1.5 Čisté rostlinné oleje

Rostlinné oleje se dají lisovat z různých plodin, kvalita a použitelnost oleje se však mění s druhem použité plodiny. Nejčastěji se rostlinné oleje vyrábějí z řepky olejky, slunečnice, podzemnice olejné, lnu nebo sójových bobů. V České republice je nejrozšířenějším typem olej z řepky olejky. Rostlinné oleje lze v automobilovém průmyslu použít jako přímé palivo pro vznětové motory nebo jsou dále upravovány k výrobě alternativního paliva na bázi methylesteru mastných kyselin (bionafty). Již několik desítek let jsou vznětové motory konstruovány a přizpůsobovány k provozu na fosilní motorovou naftu, proto dlouhodobé používání rostlinných olejů ve vznětovém motoru bez úprav spalovacího prostoru a vstříkovací soustavy není možné. Problémem jsou jeho odlišné fyzikální a palivářské vlastnosti od běžné motorové nafty. Jedná se zejména o vyšší hustotu, kinetickou viskozitu, bod vzplanutí, filtrovatelnost, nižší výhřevnost, špatnou termickou a hydrolytickou stabilitu nebo cetanové číslo, dosahující hodnoty pouze 33–43. Problémy přetrvávaly i ve směsi s motorovou naftou, která může být až do 20% podílu rostlinných olejů spalována v neupraveném vznětovém motoru. V některých literaturách je uveden podíl až 30 % rostlinných olejů. [23] Úprava palivové soustavy vznětového motoru pro provoz na čisté rostlinné oleje je velice nákladná, jelikož je nutné palivo předeřhřívát ke snížení jeho viskozity. Proto se přizpůsobení vlastností rostlinných olejů co nejvíce k fosilní motorové naftě ukázalo jako vhodnější varianta. Jedná se o chemickou úpravu rostlinných olejů do formy methylesterů mastných kyselin. Takto upravené rostlinné oleje již vyhovují k použití ve vznětových motorech, kdy se změnila zejména hodnoty kinetické viskozity, bodu vzplanutí a hustoty. [5], [18], [21]

Z dosavadních vědeckých výzkumů vyplývá, že spalování rostlinných olejů při vyšším zatížení vznětového motoru má většinou pozitivní vliv na snížení produkce emisí HC, CO a pevných částic. To je způsobené vyšší rychlostí šíření tlakové vlny u rostlinných olejů než u motorové nafty a tím dochází k dřívějšímu vstříku paliva do válce a také k jeho vznícení. Množství oxidů dusíku NO_x se nemění nebo je nepatrně vyšší. Při provozu málo zatíženého motoru je naopak produkce HC, CO a pevných částic několikanásobně vyšší, protože vyšší viskozita rostlinných olejů způsobuje horší rozprášení a odpaření paliva ve válci a celá dávka tak nestihne prohořet. Emise NO_x jsou v tomto režimu motoru nižší. [24]

Nejpoužívanější rostlinný olej se vyrábí lisováním semen z řepky olejky. Tento proces se může provádět buď za tepla nebo za studena. Technologický postup se nijak neliší od výroby olejů pro potravinářské účely. Kvalita oleje je nejvíce ovlivněna předúpravou semen a jejich lisováním. Získávání oleje za tepla probíhá ve zpracovatelských závodech při teplotě 80 až 90 °C. Používají se kontinuální šnekové lis, kdy se získává přibližně 50 % obsahu oleje obsaženého v semenech. Následně jsou výlisky dopraveny do extraktoru, kde se přidáním organických rozpouštědel získává další olej ze semen řepky. Organická rozpouštědla se musí z oleje zase odebrat. K tomu se využívá proces destilace. Oddělené rozpouštědlo se recykluje a může se opět znovu použít. Takto vyrobený rostlinný olej je potřeba ještě rafinovat, jelikož obsahuje velké množství příměsí jako jsou sloučeniny fosforu, stopy kovů a síry. Rafinací je získáván stejně kvalitní olej jako se používá v potravinovém průmyslu. Odpad při výrobě rostlinného oleje za tepla je filtrační koláč, který obsahuje velké množství bílkovin a dále se využívá jako krmivo pro hospodářská zvířata. Výtěžnost oleje tímto způsobem výroby dosahuje až 99 %. Celý postup výroby řepkového oleje za tepla je schematicky znázorněn na obrázku číslo 8. [5], [6], [18]

Obrázek 8: Výroba rostlinného oleje za tepla



Zdroj: [18]

Lisování oleje za studena probíhá na stejných šnekových lisech, pouze bez přehřevu semen a následné extrakce. Olej tak obsahuje menší množství příměsí, proto jej není třeba na závěr ani rafinovat. Pro zvýšení výtěžnosti oleje se semena ještě jednou mechanicky lisují. Odpadem při této výrobě rostlinného oleje jsou řepkové výlisky s 10 až 15% obsahem zbylého oleje. Výtěžnost oleje je tak při této technologii 85 až 90 %. Výlisky lze opět využít jako krmivo pro hospodářská zvířata. [5], [6], [18]

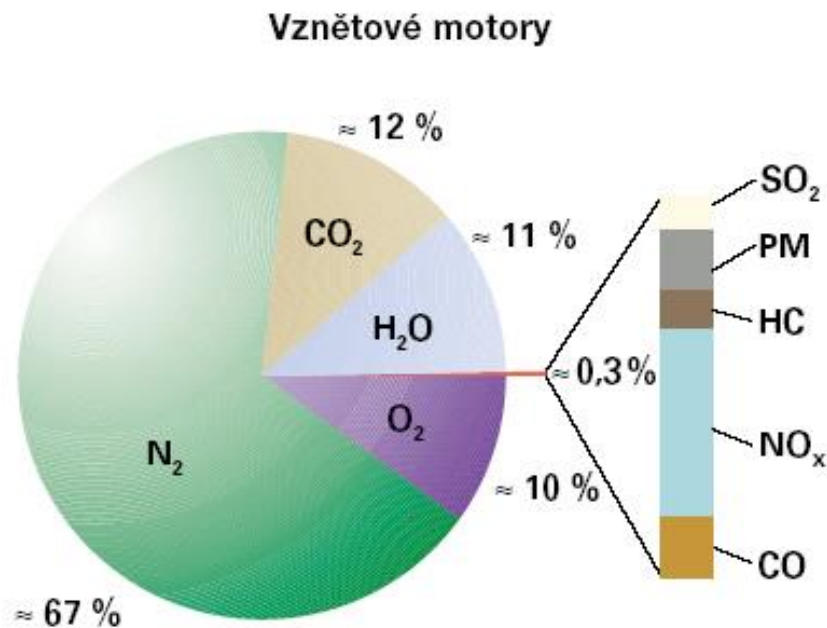
2.2 Emise vznětových motorů

K pohonu vozidel nebo pracovních strojů se využívá vznětový motor. Jeho činnost je založena na spalování směsi motorové nafty a nasávaného vzduchu, kdy dochází k oxidaci hořlavých látek, zejména uhlíku a vodíku, motorové nafty s kyslíkem, který je obsažen v nasávaném vzduchu. Spalováním paliva dochází k uvolňování tepelné a tlakové energie a k vzájemným reakcím jednotlivých složek. Během těchto procesů vznikají ve spalovacím prostoru složky ve všech skupenstvích, které mohou dále vzájemně reagovat ve výfukovém potrubí. Na kvalitu spalování a tím vznikajících emisních složkách mají vliv především způsob a kvalita rozprášení paliva a v menší míře tvar spalovacího prostoru a schopnost víření nasávaného vzduchu. [5]

Emise vznětových motorů se skládají z mnoha chemických látek, které jsou zastoupeny v různých koncentracích. Podle dosavadních vědeckých analýz se může jednat až o 160 různých výfukových složek. Typické složení výfukových plynů při provozu na běžnou motorovou naftu je znázorněno na obrázku číslo 9. Nejvíce zastoupenou složkou v emisích je dusík (N_2), který je obsažen v nasávaném vzduchu. Většina dusíku prochází spalovacím prostorem v nezměněné formě do výfukového potrubí. Jen jeho malá část oxiduje za vysokých teplot a tlaků za vzniku oxidů dusíku (NO_x). Dalšími složkami výfukových plynů jsou oxid uhličitý (CO_2), kyslík (O_2) a voda (H_2O) v podobě vodní páry, které jsou ve výfukových plynech zastoupeny přibližně stejným podílem. Nespálený kyslík se ve výfukových plynech vznětových motorů objevuje vždy, protože pracuje v oblasti chudé směsi, to znamená s přebytkem vzduchu. Oxid uhličitý a voda vznikají oxidací uhlovodíkového paliva při jeho dokonalém spalování. Vznik těchto prvků je popsán rovnicemi číslo 6 a 7. [1], [5], [25]



Obrázek 9: Složení emisí vznětových motorů

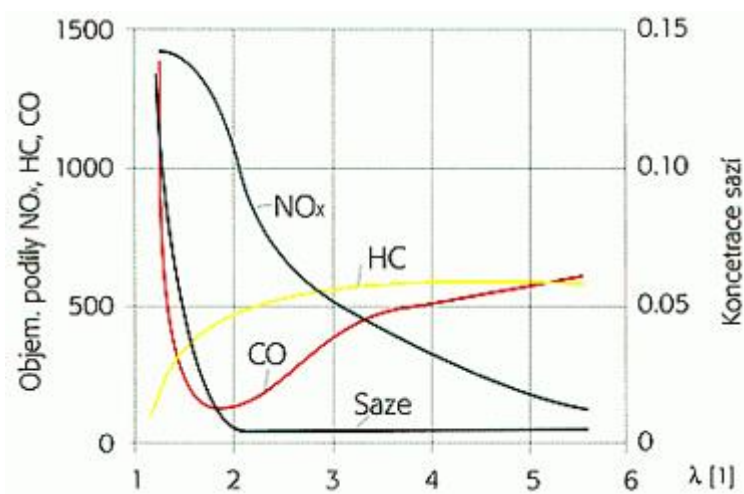


Zdroj: [1]

Protože se tato práce zabývá biopalivy na bázi čistých rostlinných olejů, za zmínění stojí porovnání určitých parametrů při spalování těchto paliv s motorovou naftou ve vznětovém motoru. K dokonalému spálení jednoho kilogramu motorové nafty je zapotřebí 3,4 kg kyslíku (O_2), což při 23 % zastoupení kyslíku ve vzduchu vyžaduje 14,78 kg vzduchu. Tím je vyprodukováno 3,15 kg oxidu uhličitého (CO_2). Naproti tomu k dokonalému spálení 1 kg řepkového oleje je zapotřebí 3,03 kg kyslíku, to odpovídá spotřebě 13,18 kg vzduchu. Produkce oxidu uhličitého je potom 2,85 kg. Z toho vyplývá, že použitím biopaliv na bázi rostlinných olejů dochází ke snížení produkce oxidu uhličitého a spotřeby kyslíku. To je zapříčiněno zastoupením kyslíku v samotném palivu. [5]

Produkce škodlivých látek ve výfukových plynech vznětových motorů výrazným způsobem závisí na součiniteli přebytku vzduchu λ . Tato závislost je zobrazena na obrázku číslo 10.

Obrázek 10: Produkce emisí vznětových motorů v závislosti na λ



Zdroj: [1]

Koncentrace oxidu uhelnatého (CO) se u vznětových motorů výrazným způsobem zvyšuje v oblasti vyššího zatížení. To odpovídá nejnižším hodnotám součinitele přebytku vzduchu λ . Než však dojde ke zvýšení tvorby CO, tak je dosažena hranice kouřivosti, která je limitem pro maximální dávku paliva. Převážná většina oxidu uhelnatého se u vznětových motorů, pracujících s přebytkem vzduchu, oxiduje na oxid uhličitý. Produkce oxidu uhelnatého vznětovými motory je ve srovnání se zážehovými motory přibližně o desetinu nižší. [1], [26]

K tvorbě oxidů dusíku (NO_x) je zapotřebí vysoké teploty, tlaku a dostatku času na reakci. Produkce NO_x se u vznětových motorů zvyšuje s rostoucí dávkou paliva. Nejvyšší koncentrace dosahuje v oblasti odpovídající součiniteli přebytku vzduchu $\lambda = 1,6$ až $1,8$. Tato hodnota odpovídá u vznětových motorů nejbohatší směsi. V této oblasti je dosahováno nejvyšší účinnosti a také nejvyšších teplot ve spalovacím prostoru. S rostoucí hodnotou součinitele λ klesá tvorba emisí NO_x, protože tím také klesá teplota spalování. [1], [5]

Nespálené uhlovodíky (HC) vznikají při velmi nepříznivých oxidačních podmínkách. Může jít o nezatížený vznětový motor pracující v oblasti vysokého součinitele přebytku vzduchu, kdy teplota hoření je velmi nízká a dochází tak k předčasnému ukončení oxidační reakce. S rostoucí dávkou paliva produkce HC klesá. [5]

Pevné částice (PM) vznikají za vysokých teplot ve spalovacím prostoru bez přístupu kyslíku. To představuje provoz vznětového motoru pod velkým zatížením nebo se může

jednat o nehomogenitu směsi paliva se vzduchem. Produkce PM klesá s rostoucím součinitelem přebytku vzduchu λ . [5]

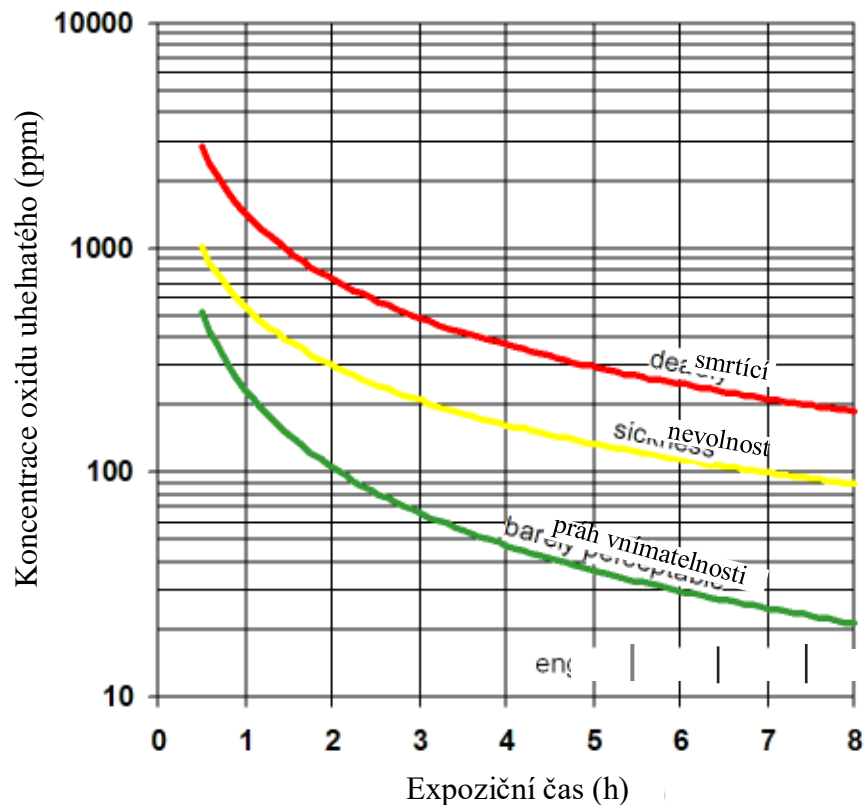
2.2.1 Oxid uhelnatý – CO

Oxid uhelnatý je bezbarvý plyn, který je člověkem těžko rozpoznatelný, protože je bez chuti a zápachu. Jedná se o škodlivý plyn pro lidský organismus a označuje se jako nejjedovatější složka výfukových plynů spalovacích motorů. Škodlivost plynu se projevuje ve tvorbě velmi pevného karboxyhemoglobinu v krevním barvivu, který zabraňuje přenosu kyslíku z plic do krevního řetězce. Jeho afinita k hemoglobinu je až 200krát vyšší než kyslíku. Dochází tak k postupnému poškozování jednotlivých orgánů lidského organismu nedostatkem kyslíku, ačkoliv se ve vdechovaném vzduchu nachází dostatečné množství kyslíku. Nejvyšší zdravotní riziko představuje pro orgány, které jsou nejvíce závislé na zásobování kyslíkem, příkladem mohou být srdce a mozek. [1], [5]

Oxid uhelnatý vzniká při nedokonalém spalování paliva za nedostatečného přístupu kyslíku ke spalované směsi, kdy nedochází k oxidaci na oxid uhličitý. Další příčinou může být místní nedostatek kyslíku ve spalovacím prostoru. Vznik oxidu uhelnatého může také nastat při vysokých teplotách spalování nad 2 000 °C jako tzv. disociace spalin, kdy dochází k rozkladu oxidu uhličitého (CO_2) a vody ve formě vodní páry (H_2O) na oxid uhelnatý (CO) a vodík (H_2). [5]

Jediným způsobem, jak se může oxid uhelnatý dostat do lidského organismu, je jeho vdechnutí. Mírná otrava se projevuje bolestí hlavy, závratěmi, tlakem na prsou nebo bušením srdce. Větší otrava způsobuje neurologické poškození lidského organismu, nevolnost, ztrátu vědomí a může vést až ke smrti. Na obrázku číslo 11 je patrná závislost koncentrace oxidu uhelnatého na expozičním čase působení plynu. Například maximální povolená koncentrace plynu v uzavřené místnosti je 35 ppm po dobu 8 hodin, kterou udává agenturou Evropské unie pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci (OSAH). Taková koncentrace je nad hodnotou, kterou je člověk schopný rozpoznat. Dále se podílí na tvorbě fotochemického (letního) smogu. [27], [28]

Obrázek 11: Závislost koncentrace oxidu uhelnatého na expozičním čase



Zdroj: [28, upraveno]

2.2.2 Oxid uhličitý – CO₂

Oxid uhličitý je bezbarvý plyn bez chuti a zápachu, velmi stabilní, málo reaktivní a nemá podstatný vliv na lidské zdraví. Určité nebezpečí se objevuje při velmi vysokých koncentracích oxidu uhličitého ve vdechovaném vzduchu, kdy začne vytěsňovat kyslík a tím hrozí lidskému organismu zadušení. Jedná se o tzv. skleníkový plyn, který v atmosféře vytváří radiační clonu a tím zabraňuje sdílení tepla mezi Zemí a jejím okolím. Dochází tak k postupnému globálnímu oteplování planety a posunu klimatických poměrů. [1]

Oxid uhličitý vzniká při dokonalém spalování paliva v motoru. Výskyt ve výfukových plynech svědčí o správně a kvalitně provedeném spalovacím procesu a úplné oxidaci veškerého uhlíku dodávaného v palivu. Sekundární vznik CO₂ je v třicestném katalyzátoru vozidla, kdy se škodlivý oxid uhelnatý oxiduje na oxid uhličitý. [1]

2.2.3 Nespálené uhlovodíky – HC

Nespálené uhlovodíky vznikají při nedokonalém spalování. Do tohoto procesu vstupují jako palivo nebo vznikají až při procesu spalování ve válci motoru, kdy nedošlo k jejich úplnému spálení nebo oxidace proběhla jen částečně. K přerušení procesu oxidace dochází z nejrůznějších důvodů, nejčastěji se jedná o ochlazení paliva o chladnou stěnu válce motoru. Nespálené uhlovodíky se z vnějšku projevují jako bílý kouř z výfuku vozidla a způsobují specifickou vůni výfukových plynů. Zkratka této složky výfukových plynů je odvozena z anglického názvu hydrocarbon. [1], [29]

Jedná se o různé sloučeniny uhlovodíků s rozdílnými škodlivými účinky. Za nejméně škodlivé pro lidský organismus jsou považovány nezměněné uhlovodíky, které jsou původními skupinami uhlovodíkového paliva. Částečně spálené uhlovodíky jsou toxické a karcinogenní, proto představují pro lidský organismus vyšší škodlivost. Nejnebezpečnějším druhem jsou polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH), které vždy mají alespoň dvě benzenová jádra. V současné době je rozeznáváno velké množství PAH. Mezi nejznámější patří benzo-a-pyren (BaP). PAH vznikají za vysokých teplot hoření paliva bez dostatečného množství kyslíku nebo jako zbytky mazacího oleje na stěnách válce motoru. Nebezpečí pro lidský organismus spočívá již při velmi nízkých koncentracích a expoziční době. Polycyklické aromatické uhlovodíky mají velmi dobrou schopnost se vázat na povrch pevných částic, které jsou také produkovány spalovacím motorem. Tím se snadno šíří atmosférou a vdechnutím se dostávají do lidského těla. Škodlivost se nejvíce projevuje na sliznici, dýchacích cestách a vedou k poruchám podmíněných reflexů. [1], [5], [29], [30]

2.2.4 Oxidy dusíku – NO_x

Mezi oxidy dusíku patří především oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO₂). V některých literaturách se do skupiny oxidů dusíku uvádí i oxid dusný (N₂O), jedná se ovšem o velmi stabilní, zdraví neškodný plyn, proto se ve většině publikací neuvádí mezi škodlivé emise. [5] Oxidy dusíku se zásadním způsobem podílejí na tvorbě letního smogu a okyselení dešťových srážek. [1], [5], [31]

Oxid dusnatý je za běžných podmínek bezbarvý, nehořlavý plyn s ostrým nasládlým zápachem. Pro živý organismus je jeho škodlivost celkem nízká, ovšem pro člověka je

jedovatý. V přítomnosti vlhkosti se stává leptajícím. Vzniká při spalování paliva oxidací dusíku, obsaženého v nasávaném vzduchu, za vysokých teplot (okolo 1 800 až 2 000 °C) a tlaků při mírném přebytku kyslíku, tedy v oblasti mírně chudé směsi. Vznětové motory produkují menší množství oxidů dusíku, protože pracují stále v oblasti chudé směsi. Podíl oxidu dusnatého mezi oxidy dusíku je 90 % a více. [1], [5], [32], [33]

„Opatření vedoucí ke snížení spotřeby paliva mohou vést ke zvýšení podílu oxidů dusíku ve výfukových plynech, neboť účinnější spalování vede k vyšším teplotám spalování.“ [32]

Vznik oxidu dusnatého popisuje Zeldvičova řetězová reakce uvedená jako rovnice číslo 8. V závislosti na daných koncentracích volných radikálů N, O, H a teplotě, mohou reakce probíhat v opačném smyslu.



Oxid dusičitý je červenohnědý, silně zapáchající plyn, který je prudce jedovatý. Vzniká především ve výfuku vozidel oxidací oxidu dusnatého při teplotě pod 650 °C. Pro člověka představuje riziko v podobě zánětů horních cest dýchacích. Může se jednat o lehké formy onemocnění až po vážný edém plic. Po vdechnutí dochází ke tvorbě kyseliny dusičné (HNO₃) na stěnách sliznice, a to již při velmi nízkých koncentracích a expozičním čase. Konečným důsledkem je její popálení. Tělo člověka reaguje na kyselinu dusičnou jako při začínajícím požáru a samovolně přivírá přístup kyslíku do plic. Tím u člověka nastává pocit dušení a nutí ho ke kašli. Při dlouhodobém působení může nastat smrt snížením okysličení lidského organismu. [1], [5], [33]

2.2.5 Pevné částice – PM

Všeobecná definice pevné částice zatím neexistuje. Mezi pevné částice se podle zákonů USA řadí všechny prvky ve výfukových plynech motoru, které mají za normálních podmínek pevné nebo kapalně skupenství. Pevné částice mohou obsahovat primární uhlík, organický uhlík, sulfáty, dusík, vodu a další špatně identifikovatelné složky. Konkrétně se jedná o saze, karbon, popel, zbytky nespáleného paliva a mazacího oleje nebo otěrové částice

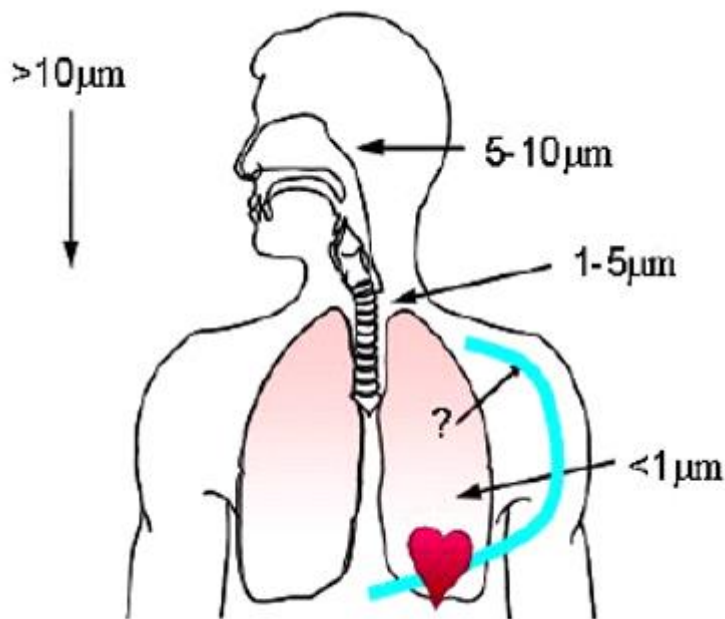
z funkčních ploch spalovacího prostoru. Projevují se jako tmavý kouř z výfuku vozidel, který je často rozpoznatelný lidským okem. Pevné částice se vyskytují převážně u vznětových motorů. V dnešní době se ovšem, kvůli přechodu na přímé vstřikování benzínu, objevují i u motorů zážehových. Zkratka této složky výfukových plynů je odvozena z anglického názvu particulate matter. [1], [5], [33], [34]

Jádro pevné částice je tvořeno z pevného uhlíku nebo popela. Na jeho povrchu snadno sorbuje velké množství zdraví škodlivých látek, jako je například karcinogenní polycyklický aromatický uhlovodík benzo-a-pyren. Škodlivost samotného pevného jádra je tedy pro lidský organismus velmi nízká, záleží ovšem jaký prvek se na něm zachytí. V dnešní době se vědecké výzkumy pevnými částic zabývají ve velkém měřítku, protože mohou vznikat velmi nebezpečné složky výfukových plynů s karcinogenními účinky. Pevné částice mohou způsobit podráždění oka, jícnu, průdušek nebo neurofyziologické symptomy, jako jsou nucení ke zvracení nebo pocit dušení, a to už při krátkých dobách expozice. Dlouhodobá expozice pevných částic může způsobit zánět plic. [1], [33]

Pevné částice mohou mít různé velikosti, proto jsou rozčleněny do tří skupin PM_{10} , $PM_{2,5}$ a $PM_{1,0}$. Číslice, uvádějící název dané skupiny, odpovídá velikosti částic v μm , proto do skupiny PM_{10} patří všechny částice nabývající velikosti menší než 10 μm . Velikost částic závisí i na době, kterou jsou schopné se udržet ve volném vzduchu, než dojde k jejich usazení. Částice PM_{10} se udrží ve vzduchu maximálně několik hodin, zatímco $PM_{1,0}$ může poletovat až několik týdnů, dokud nedojde k jejich spláchnutí deštěm. [35]

Malá velikost částic usnadňuje jejich distribuci do lidského organismu. Pevné částice o velikosti větší než 10 μm se zachytí na nosní sliznici. Menší částice do 5 μm se dostanou do horních cest dýchacích a jsou eliminovány v nosních dutinách. Malé částice pod 5 μm pronikají hlouběji do dýchacích cest, ale jsou zachyceny na průduškách. Částice menší než 1 μm mohou doputovat až do plicních sklípků. Nejmenší částice, zejména menší než 0,1 μm , mohou proniknout skrz plicní stěnu do lymfatického systému nebo dále až do krevního řečiště. Částice jsou poté krví unášeny po celém těle, proto představují pro lidský organismus největší nebezpečí. Distribuce pevných částic do lidského těla v závislosti na jejich velikosti je znázorněna na obrázku číslo 12. [1], [35]

Obrázek 12: Distribuce PM podle velikosti do lidského těla



Zdroj: [1]

2.2.6 Oxidy síry – SO_x

Mezi oxidy síry se řadí pouze hlavní produkt, kterým je oxid siřičitý (SO_2). Jedná se o bezbarvý, nehořlavý, ostře páchnoucí, jedovatý plyn, který napadá sliznici a plíce. Do lidského těla se dostává jedinou cestou, kterou je vdechnutí. Při větších koncentracích snižuje odolnost proti infarktu a způsobuje otok hrtanu a plic. Oxidy síry se podílejí na tvorbě kyselých dešťů, které mají negativní vliv na životní prostředí. [32]

V motorové naftě je obsažena síra, která reaguje s kyslíkem v nasávaném vzduchu. Oxid siřičitý je proto produkovaný zejména vznětovými motory. Produkce oxidu siřičitého je regulována pouze nepřímo. Konkrétně se jedná o maximální obsah síry v motorové naftě, který je regulován normou ČSN EN 590. Obsah síry v motorové naftě se stále snižuje a tím dochází i ke snižování produkce emisí oxidu siřičitého ze vznětových motorů. Podíl produkovaných emisí oxidů síry spalovacími motory je zanedbatelný v porovnání s celkovou produkcí z průmyslu. [1], [5], [32]

2.3 Metody měření emisí vznětových motorů

Protože provoz vozidel se spalovacími motory produkuje velké množství emisí, mající negativní dopady na kvalitu okolního prostředí, byly vydány emisní limity, které musí splňovat každý spalovací motor. [1]

Pravidelnými emisními kontrolami je docíleno sledování vývoje a udržení dobrého technického stavu vznětových motorů vozidel v průběhu jejich provozu. Sledovanou veličinou pro tento typ motorů je kouřivost. Měření kouřivosti lze provádět několika různými metodami. Jedná se o měření opacimetrie, filtrační metodu a hmotnostní měření koncentrace částic. Nejčastěji používanou metodou je opacimetrie, která je podle vyhlášky 211/2018 Sb. o technických kontrolách a měření emisí vozidel, jedinou přípustnou metodou pro měření kouřivosti vznětových motorů na stanicích měření emisí. [26]

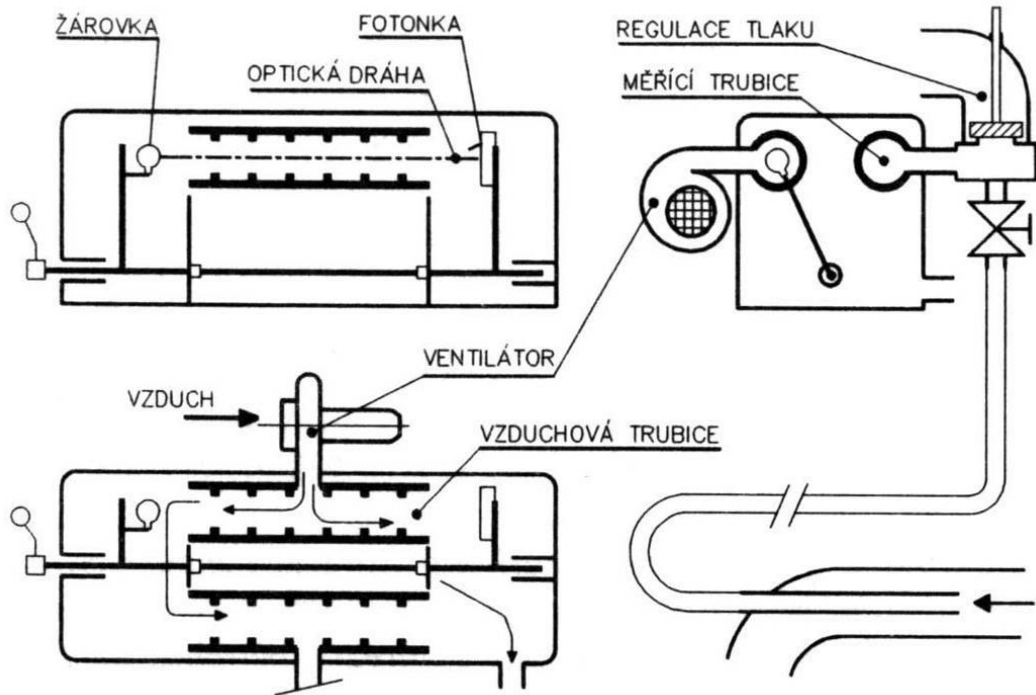
2.3.1 Opacimetrie

Tato metoda je založena na pohltivosti světelného toku procházejícího přes sloupec výfukových plynů na principu Behn–Lambertova zákona. Měřenou veličinou je opacita (průchodnost světla). K jejímu měření se využívá přístroj zvaný opacimetr. [26], [36]

Měření opacimetrie v samotném základu nepředstavuje velké obtíže. Určitý problém nastává v udržení čistoty zdroje světla (žárovky) a čidla (fotonky). Během měření by se na jejich povrchu mohly usazovat částice, které by měnily opacitu a mohly by způsobovat chybu naměřených hodnot. Konstrukce opacimetru je tak řešena za pomoci dvou rovnoběžných trubic, jedné vzduchové a druhé měřicí, a překlopného držáku se žárovkou a fotonkou. Konstrukce je znázorněna na obrázku číslo 13. [26]

Před vlastním měřením opacimetrie je žárovka a fotonka v poloze, kdy optická dráha prochází skrze vzduchovou trubici a jejich povrch je vystaven proudu čistého vzduchu. Přívod výfukových plynů je přitom uzavřen. Během měření je držák se žárovkou a fotonkou překlopen do polohy, kdy optická dráha prochází skrze měřicí trubici a zároveň je do ní vpuštěn vzorek výfukových plynů od motoru. Promíchání výfukových plynů s čistým vzduchem je eliminováno vyšším tlakem výfukových plynů. Po ukončení měření je držák překlopen zpět do polohy, kdy je povrch žárovky a fotonky intenzivně omýván proudem čistého vzduchu a zbaven tak případných částic. [26]

Obrázek 13: Schéma konstrukce opacimetru pro měření kouřivosti



Zdroj: [26]

Opacimetr je vybaven ukazatelem lineárního stupně absorpce světla N , který je rozdělena na 100 dílů HSU (Hartridge Smoke Unit). Pro zjištění součinitele absorpce světla k , je třeba hodnotu této veličiny přepočítat podle rovnice číslo 9, kde L je délka (mezi žárovkou na fotonkou) optické dráhy světelných paprsků procházející výfukovými plyny. Když je přívod výfukových plynů uzavřen, tak by na stupnici opacimetru měla být hodnota lineárního stupně absorpce světla $N = 0$. Jinak je nutné před vlastním měřením hodnotu nula na ukazateli nastavit ručně. [26], [36]

$$k = \frac{-1}{L} * \ln \left(1 - \frac{N}{100} \right) \quad (9)$$

2.3.2 Filtrační metoda

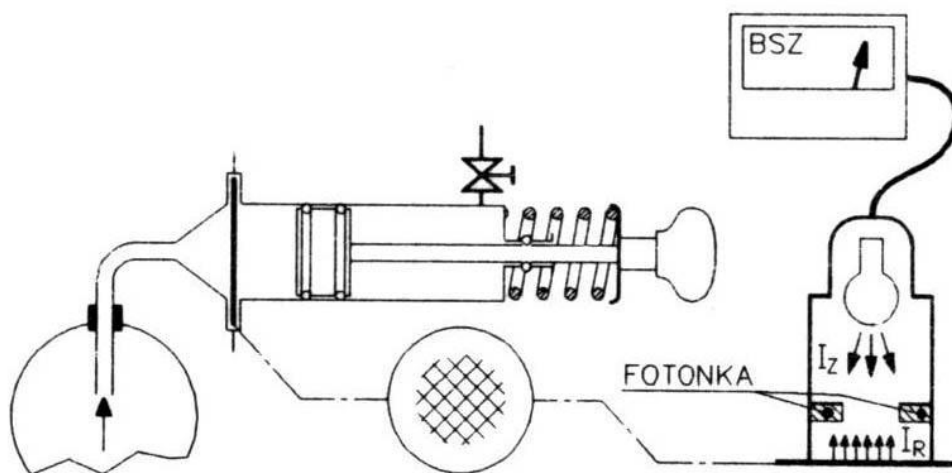
Filtrační metoda je založena na zachycení částic kouře na filtračním papíru. Měření probíhá ve dvou krocích, které jsou zobrazeny na obrázku číslo 14. V prvním kroku probíhá odběr vzorku výfukových plynů pomocí ruční sondy. Ve druhém kroku se vyhodnocuje znečištění filtračního papíru ve fotoelektrickém měřicím přístroji. Tato metoda se nehodí pro

dynamické měření spalovacích motorů. V současné době se jedná o velmi zastaralou metodu, která se již běžně nepoužívá. [26], [36]

Před měřením se zasune píst sondy do krajní polohy, ve které se zajistí. Čistý filtrační papír se vloží do připravené štěrbině před píst. Nátrubek sondy se poté umístí do výfukového potrubí vozidla. Po odblokování pístu sondy dojde pomocí stlačené pružiny k sacímu zdvihu pístu. Dochází tak k prosátí definovaného množství výfukových plynů definovanou rychlostí přes filtrační papír. Sací rychlost lze regulovat pomocí škrtícího ventilu umístěného za pístem na konci válce sondy. [26]

Vyhodnocení se provádí opticky ve fotoelektrickém měřicím zařízení, kdy se porovnává použitý filtrační papír, ve kterém jsou zachycené saze a jiné částice, s novým nepoužitým filtračním papírem. Přístroj měří množství světla, které se odrazí zpět od použitého filtračního papíru ve srovnání s množstvím světla odraženého od nového filtračního papíru. Rozdíl v množství odraženého světla je vyhodnocen jako stupeň zčernání filtračního papíru a může být uveden v jednotkách SZ (Schwarzungszahl), BSZ (Bosch Schwarzungszahl) nebo Bn (Bosch number). [26]

Obrázek 14: Měření kouřivosti filtrační metodou – přístroj Bosch



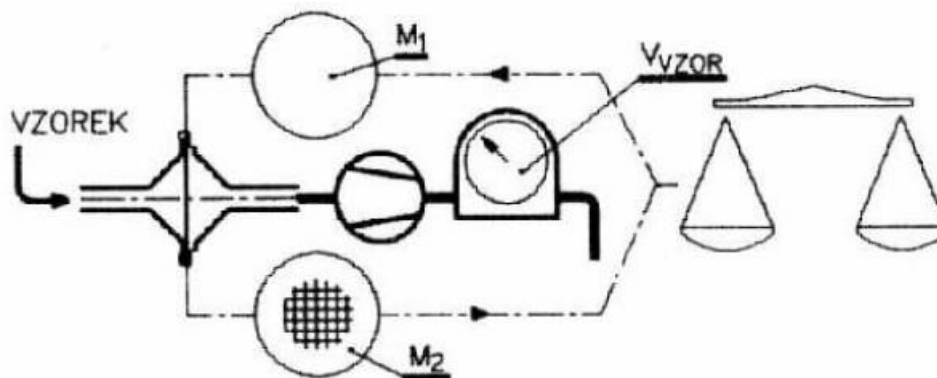
Zdroj: [26]

2.3.3 Hmotnostní měření koncentrace částic

Tato metoda pro zjištění kouřivosti vznětových motorů je založena na hmotnostním rozdílu filtračního elementu váženého před měření a následně po něm. Filtrační element je vyroben ze skelných vláken a jeho povrch je potažen teflonem, komerčně dostupný pod

názvem Pallflex. Základní princip této metody je velmi jednoduchý a je znázorněný na obrázku číslo 15. [26], [36]

Obrázek 15: Měření kouřivosti hmotnostní koncentrací částic



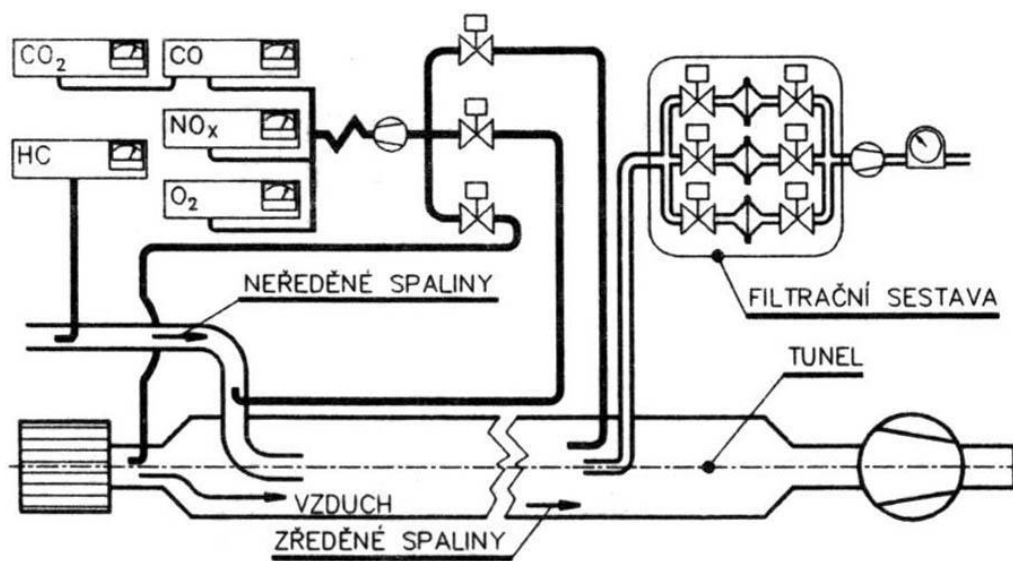
Zdroj: [26]

Nejprve se zjistí hmotnost nového nepoužitého filtračního elementu zvážením na přesných laboratorních vahách. Následně je filtrační element vložen do připravené štěrbině v potrubí, kde je přes něj prosát vzorek výfukových plynů definovaného množství. Na konci měření se znovu zváží filtrační element, na kterém došlo k zachycení částic a sazí obsažených ve výfukových plynech. Hmotnostní koncentrace částic c se poté vypočítá podle rovnice číslo 10, kde m_1 je hmotnost filtračního elementu před prosátím vzorku výfukových plynů, m_2 je hmotnost filtračního elementu po prosátí a V_{VZOR} je objem vzorku výfukových plynů. [26], [36]

$$c = \frac{m_2 - m_1}{V_{VZOR}} [kg * m^{-3}] \quad (10)$$

Protože se na povrchu pevných částic sorbují další prvky výfukových plynů, které mohou být toxické nebo karcinogenní, je nutné co nejpřesněji simulovat podmínky pro jejich vznik a vázání na pevné částice. Pouze tehdy má hmotnostní měření koncentrace částic význam. K tomu se využívá plnoprůtokový tunel schematicky znázorněný na obrázku číslo 16. Výfukové plyny se zde mísí se vzduchem, jehož dostatečné množství je dodáváno speciálním dmychadlem, umístěným na výstupní straně tunelu. Tím dochází k podobným podmínkám, jako když výfukové plyny opouští výfukové potrubí a mísí se za jeho ústím s okolním vzduchem. [26], [36]

Obrázek 16: Plnoproudový tunel pro měření koncentrace částic



Zdroj: [26]

3 Cíl práce a metodika

3.1 Cíl práce

Hlavním cílem této diplomové práce je porovnat tvorbu pevných částic ve vznětových motorech při použití různých koncentrací biosložek v motorové naftě. Spalovací motor traktoru bude během měření zatěžován v rámci normalizovaného NRSC zkušebního cyklu. K dosažení tohoto hlavního cíle je možné experimentální část rozdělit do těchto dílčích cílů:

- měření vnější otáčkové charakteristiky vznětového motoru traktoru při provozu na čistou motorovou naftu a na naftu s příměsí biosložek,
- měření produkce pevných částic vznětového motoru traktoru při provozu na čistou motorovou naftu a na naftu s příměsí biosložek,
- vyhodnocení a porovnání naměřených dat vznětového motoru při použití všech měřených paliv

3.2 Metodika

V této kapitole je uveden postup prací experimentálního měření, které byly potřeba k získání a zpracování naměřených dat a tím mohl být splněn cíl této diplomové práce. Kapitola je rozdělena na čtyři podkapitoly tak, aby mohly být splněny jednotlivé dílčí cíle práce. První podkapitola popisuje postup měření vnější otáčkové charakteristiky motoru a následné sestavení jednotlivých bodů v NRSC zkušebním cyklu pro jednotlivá zkušební paliva. Ve druhé podkapitole je popsán postup měření produkce pevných částic při provozu paliva na jednotlivá zkušební paliva. Třetí podkapitola uvádí postup zpracování naměřených dat. V poslední podkapitole jsou popsány použité stroje a zařízení potřebné k tomuto experimentálnímu měření.

Měření vnější otáčkové charakteristiky a produkce pevných částic vznětových motorů při použití biopaliv bylo prováděno ve zkušební laboratoři Katedry jakosti a spolehlivosti strojů na Technické fakultě České zemědělské univerzity v Praze. Katedra disponuje traktorem Zetor Forterra 8641, který byl využit pro tato měření. Traktor byl přes vývodovou hřídel zatěžován dynamometrem MAHA LPS-ZW 500. Toto uspořádání stanoviště ve zkušební laboratoři je zobrazeno na obrázku číslo 17.

Obrázek 17: Uspořádání stanoviště k měření



Sací potrubí traktoru bylo upraveno tak, že jeho délka byla prodloužena pomocí rovné polypropylenové trubky přibližně o dva metry. Tím bylo zajištěno laminární proudění nasávaného vzduchu v místě snímače průtoku, který byl umístěn zhruba v její polovině. Konec této trubky byl osazen bezztrátovou vtokovou dýzou s U-manometrem pro zjišťování tlaku v sacím potrubí.

Výfukové potrubí nebylo konstrukčně nijak upravováno, pouze bylo opatřeno snímačem teploty výfukových plynů a sondou pro emisní analyzátor BrainBee AGS-200 a opacimetr BrainBee OPA-100. Výfukové potrubí bylo dále osazeno spektrometrem EEPS 3090 sloužícího k měření velikosti a koncentrace pevných částic ve výfukových plynech, které jsou před vstupem do zařízení ochlazeny na teplotu přibližně 23 °C a ředěny v poměru 0,01007. Toto zařízení bylo nejdůležitější k získání potřebných dat pro tuto diplomovou práci.

Traktor byl osazen snímači otáček motoru a teploty olejové náplně. Další úprava traktoru spočívala v odpojení palivové nádrže traktoru, která byla nahrazena nádrží externí. Externí nádrž byla umístěna na laboratorní váze VIBRA AJ-6200, na které bylo možné sledovat hmotnostní ubytek paliva v průběhu měření. Dále byla palivová soustava vybavena snímači teploty paliva. Významné přístroje a zařízení potřebné k získání dat pro tuto práci jsou více popsána v kapitole 3.2.4.

Pro toto měření byly biosložky ve vytvořených zkušebních směsích zastoupeny rostlinnými oleji. Přesněji se jednalo o řepkové a slunečnicové oleje, které byly míchány

s čistou motorovou naftou v určitých poměrech. Vlastnosti rostlinných olejů a jejich výroba jsou popsány v kapitole 2.1.5. Konkrétně bylo vytvořeno a měřeno těchto pět zkušebních paliv:

- čistá motorová nafta bez biosložek,
- směs motorové nafty a řepkového oleje v poměru 95/5 obj. %,
- směs motorové nafty a řepkového oleje v poměru 80/20 obj. %,
- směs motorové nafty a slunečnicového oleje v poměru 95/5 obj. %,
- směs motorové nafty a slunečnicového oleje v poměru 80/20 obj. %.

V rámci experimentálního měření těchto zkušebních paliv se zjišťovala jejich hustota, dynamická a kinematická viskozita. Měření těchto parametrů probíhalo na univerzálním viskozimetru SVM 3001, který umožňuje měření všech tří parametrů. Jeho technické parametry jsou uvedené v kapitole 3.2.4. Každé zkušební palivo bylo měřeno při dvou teplotách, které byly stanoveny na 15 a 40 °C. Měření probíhalo pro každé zkušební palivo při dané teplotě dvakrát. Aritmetické průměry všech naměřených parametrů při dané teplotě jsou pro jednotlivá zkušební paliva uvedeny v tabulce 3. V tabulce jsou také uvedeny naměřené hodnoty hmotnostní a objemové výhřevnosti jednotlivých zkušebních paliv.

Tabulka 3: Změřená hustota a viskozity zkušebních paliv

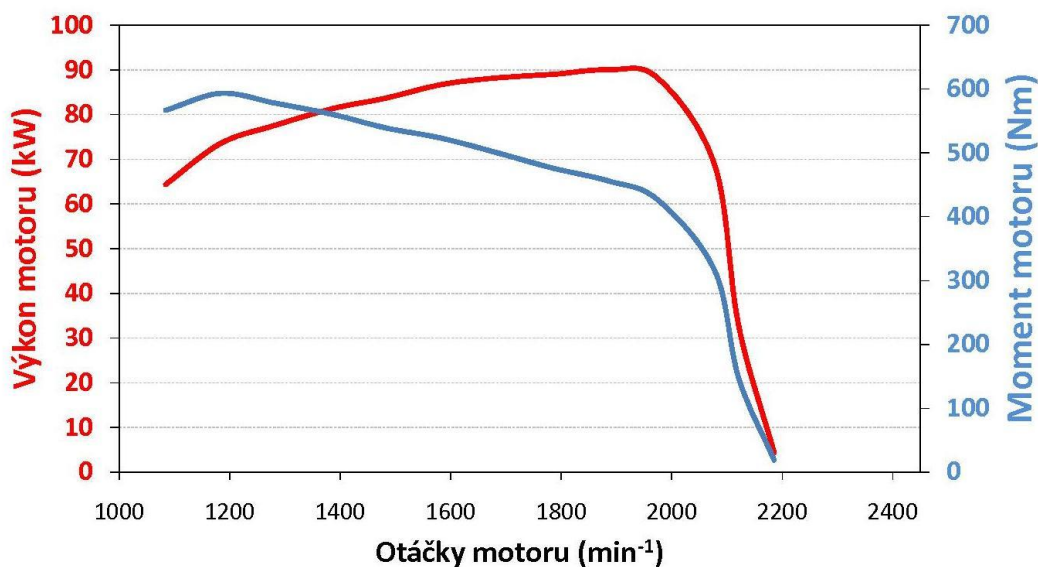
	Teplota	Hustota	Dynamická viskozita	Kinematická viskozita	Výhřevnost	
	°C	kg.m ⁻³	mPa.s	mm ² .s ⁻¹	MJ.kg ⁻¹	MJ.l ⁻¹
Nafta	15	819,10	2,329	2,844	43,151	35,345
	40	801,65	1,444	1,801		34,592
20 % řep. oleje	15	836,10	4,216	5,042	41,741	34,900
	40	818,75	2,444	2,984		34,175
5 % řep. oleje	15	821,90	2,650	3,224	42,724	35,115
	40	804,40	1,627	2,022		34,367
20 % slun. oleje	15	839,85	4,426	5,270	41,718	35,036
	40	822,45	2,540	3,088		34,311
5 % slun. oleje	15	824,35	2,726	3,307	42,681	35,184
	40	806,90	1,647	2,041		34,439

3.2.1 Metodika měření vnější otáčkové charakteristiky motoru

Před měřením vnější otáčkové charakteristiky motoru při provozu na jednotlivá zkušební paliva bylo třeba motor traktoru zahřát na provozní teplotu a ujistit se, že celá palivová soustava traktoru byla propláchnuta a již obsahuje pouze testovaný typ paliva. Toho bylo docíleno přibližně po 40 minutách provozu traktoru na volnoběžné otáčky a samotné měření mohlo být zahájeno. Po celou dobu měření vnější otáčkové charakteristiky byla nastavena plná dávka paliva plynovou pákou pod volantem a motor byl postupně zatěžován dynamometrem připojeným na zadní vývodovou hřídel, na kterém docházelo ke zvyšování brzdného momentu, čímž otáčky motoru traktoru klesaly. Při tomto měření byly zaznamenány hodnoty točivého momentu a výkonu motoru v závislosti na jeho otáčkách a následně byly vyneseny do grafického znázornění. Ukázka grafu vnější otáčkové charakteristiky traktorového spalovacího motoru je znázorněna na obrázku číslo 18. Toto měření také slouží ke stanovení měřících bodů v rámci následujícího NRSC zkušební cyklu, kdy jsou mezilehlé otáčky určeny jako otáčky při dosažení nejvyššího točivého momentu motoru.

Obrázek 18: Ukázkové znázornění vnější otáčkové charakteristiky motoru

Jmenovitá otáčková charakteristika motoru



Zdroj: <http://files.mobilnibrzda.webnode.cz/200000009-0c9360d8ce/Charakteristiky-Pm-2.jpg>

3.2.2 Metodika měření vlivu paliv na produkci pevných částic

Během měření pevných částic produkovaných vznětovým motorem při provozu na jednotlivá zkušební paliva byl motor traktoru zatěžován v rámci normalizovaného NRSC zkušebního cyklu, který je podrobně popsán v této kapitole níže.

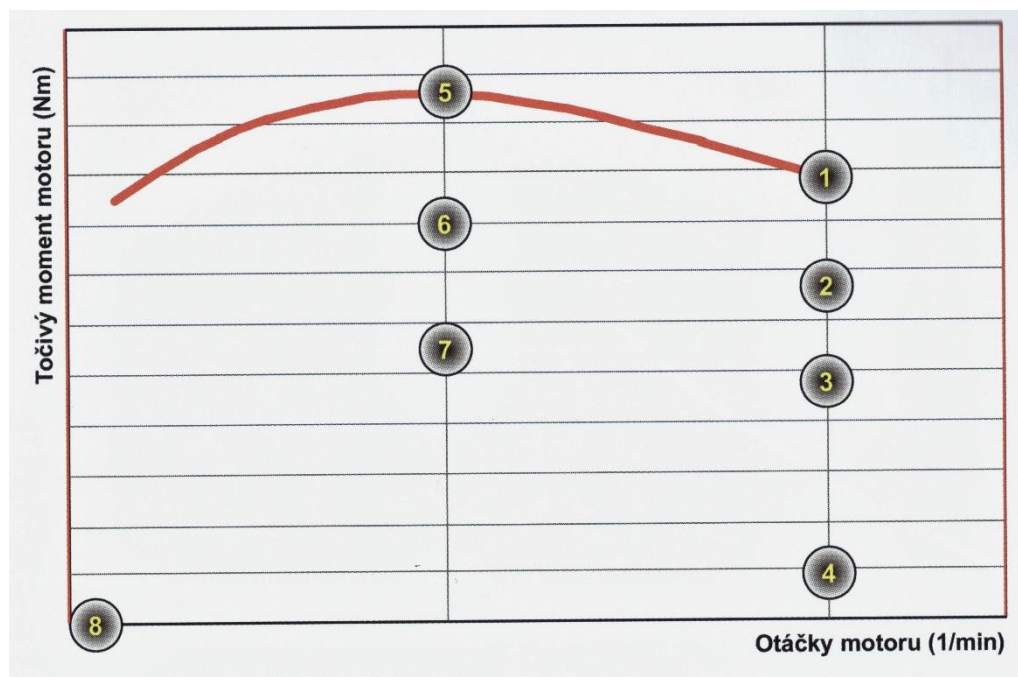
Měření produkce pevných částic vznětovým motorem pro jednotlivá zkušební paliva následovalo okamžitě po naměření vnější otáčkové charakteristiky motoru na dané palivo. Z tohoto důvodu byl traktor zahřátý na provozní teplotu a palivová soustava obsahovala pouze aktuálně měřené palivo. Pro každé zkušební palivo byly z vnější otáčkové charakteristiky stanoveny měřící body, charakterizované otáčkami motoru a jeho zatížením. Následně bylo pro každé palivo změřeno všech 8 bodů zkušebního cyklu. V každém měřícím bodě se přesně nastavily hodnoty otáček motoru traktoru a brzdného momentu dynamometru tak, aby byly v ustáleném stavu po celou dobu měření, které trvalo přibližně 80 sekund. Pomocí uživatelského rozhraní v počítači, kterým byl ovládán dynamometr, byly nastaveny otáčky vývodové hřídele (resp. otáčky motoru), jejich hodnota byla dynamometrem automaticky regulována. Následně operátor traktoru pomocí ruční plynové páky pod volantem manuálně doladil dávku paliva, která určovala zatížení motoru. Hodnoty velikosti a koncentrace pevných částic byly odečteny pro každý měřící bod. Po ukončení měření daného paliva byla palivová soustava traktoru propláchnuta novým zkušebním palivem. Zbylé palivo bylo čerpáno do odpadního kanystru a postupně nahrazováno novým tak, aby nedošlo k jejich mísení a tím i ovlivnění dalšího měření.

NRSC zkušební cyklus

Zkušební cyklus NRSC je definovaný normou ISO 8178-4 (typ C1) a skládá se z 8 normalizovaných režimů otáček a zatížení v ustáleném stavu motoru. Jednotlivé režimy a jejich posloupnost jsou graficky zobrazeny na obrázku číslo 19. Tyto režimy odpovídají typickému provoznímu rozsahu vznětových motorů zemědělských traktorů. V každém normalizovaném režimu musí motor pracovat nejméně 10 minut, přičemž produkované emise jsou měřeny v posledních 3 minutách. [38] Každému z osmi režimů je přidělena váhová konstanta, kterou je výsledná hodnota emisí násobena. Otáčky, zatížení a váhová konstanta jsou pro jednotlivé režimy uvedeny v tabulce 4. Jmenovité otáčky představují maximální otáčky motoru udávané výrobcem, které dovoluje regulátor při plném zatížení. Mezilehlé otáčky se určují jako otáčky při maximálním točivém momentu motoru

za podmínky, že se tyto otáčky pohybují v rozmezí 60 až 75 % otáček jmenovitých. V případě, kdy není splněna tato podmínka, jsou za mezilehlé otáčky zvoleny krajní hodnoty tohoto rozmezí podle toho, zda skutečné otáčky leží nad nebo pod tímto rozmezím. [5], [37]

Obrázek 19: Zkušební cyklus NRSC



Zdroj: [5]

Tabulka 4: Parametry pro zkušební cyklus NRSC

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

Zdroj: [5]

3.2.3 Metodika vyhodnocení naměřených dat zkušebních směsí paliv

V průběhu zatěžování motoru traktoru v rámci NRSC zkušebního cyklu byla naměřena data ze všech přístrojů, kterými byl traktor osazen. Pro zjištění produkce pevných částic produkovaných motorem na vybraná zkušební paliva byla vyhodnocena data pouze ze spektrometru EEPS 3090 a vířivého dynamometru MAHA LPS-ZW 500. Tato data byla zpracována v počítačovém programu Excel.

V programu Excel byly k vyhodnocení naměřených dat použity jeho funkce aritmetický průměr a suma. Dále byly hodnoty točivého momentu, výkonu nebo počtu pevných částic směsných paliv porovnány s hodnotami motorové nafty podle základního vzorce k zjištění jejich procentuálního podíl, který je uveden v rovnici číslo 11.

$$PR = \left(\frac{H_{sp}}{H_{mn}} * 100 \right) - 100 \quad (11)$$

kde: PR ... procentuální podíl [%]

H_{sp} ... hodnota pro směsné palivo [Nm, kW, počet.cm⁻³]

H_{mn} ... hodnota pro motorovou naftu [Nm, kW, počet.cm⁻³]

Pro vypočtení výsledné měrné koncentrace pevných částic za celý NRSC zkušební cyklus byla použita rovnice číslo 12. V každém měřicím bodě byla naměřená koncentrace pevných částic vynásobena váhovým faktorem daného měřicího bodu. Suma těchto součinů byla podělena sumou váženého výkonu, který se vypočetl jako součin naměřeného výkonu a váhového faktoru daného měřicího bodu.

$$mPM = \frac{\sum_{i=1}^8 (PM_i * VF_i)}{\sum_{i=1}^8 (P_i * VF_i)} \quad (12)$$

Kde: mPM ... měrná koncentrace pevných částic [počet.cm⁻³.kW⁻¹]

PM_i ... koncentrace pevných částic v režimu i [počet.cm⁻³]

P_i ... výkon motoru v režimu i [kW]

VF_i ... váhový faktor v režimu i [-]

3.2.4 Použité přístroje a zařízení

Traktor – Zetor Forterra 8641

Měření čisté motorové nafty a směsi rostlinných olejů s motorovou naftou probíhalo na univerzitním traktoru značky Zetor Forterra typu 8641. Tento traktor disponuje řadovým čtyřválcovým turbodmychadlem přeplňovaným vznětovým motorem s přímým vstřikem paliva do válce, který nese označení 1204. Traktor byl vyrobený v roce 2006. Vybrané technické údaje tohoto traktoru jsou uvedené v tabulce 5.

Tabulka 5: Technické údaje traktoru Zetor Forterra 8641

Parametr		Hodnota
Typ motoru		1204
Druh motoru		Vznětový, čtyřdobý s přímým vstřikem paliva, přeplňovaný turbodmychadlem
Provedení motoru		Řadový, stojatý, chlazený vodou
Druh rozvodu		OHV
Počet válců		4
Obsah válců	cm ³	4156
Vrtání x zdvih	mm	105 x 120
Kompresní poměr		17
Jmenovité otáčky	ot.min ⁻¹	2200
Max. přeběhové otáčky	ot.min ⁻¹	2460
Volnoběžné otáčky	ot.min ⁻¹	750 ± 25
Čistý výkon při jmenovitých otáčkách	kW	60
Max. točivý moment	Nm	351
Převýšení Mt	%	35
Specifická spotřeba paliva při uvedeném výkonu	g.kW ⁻¹ .h ⁻¹	253

Zdroj: [39]

Dynamometr MAHA ZW 500

Motor měřeného traktoru byl zatěžován dynamometrem MAHA LPS-ZW 500, který byl s traktorem spojený pomocí vývodové hřídele. Jedná se o dynamometr s dvěma brzdami vířivých proudů, který pracuje s procentuální odchylkou menší než 1 %. Naměřený točivý moment byl přepočten převodovým poměrem mezi otáčkami motoru a otáčkami vývodové hřídele, který nabývá hodnoty 3,543. Vybrané technické parametry dynamometru MAHA LPS-ZW 500 jsou uvedené v tabulce 6.

Tabulka 6: Technické parametry dynamometru Maha LPS-ZW 500

Parametr		Hodnota
Maximální brzdný výkon	kW	500
Maximální otáčky	min ⁻¹	2 500
Maximální točivý moment	Nm	6 600
Velikost hřídele	"	1 ¾ (šesti drážkový)
Rozměry (d x š x v)	mm	3 580 x 2 110 x 1 420
Hmotnost	kg	1 300

Zdroj: [40, upraveno]

Spektrometr EEPS 3090

K určení velikosti a koncentrace pevných částic produkovaných motorem traktoru byl použit částicový velikostní analyzátor (spektrometr) EEPS (Engine Exhaust Particle Sizer), vyrobený společností TSI Incorporated, jehož výstupem je počet částic v 1 cm³ zředěných výfukových plynů. Konkrétně se jednalo o model EEPS 3090, který je na obrázku číslo 20. Vybrané technické parametry tohoto spektrometru jsou uvedené v tabulce 7.

Tabulka 7: Vybrané parametry spektrometru EEPS 3090

Parametr		Hodnota
Rozsah velikostí částic	nm	5,6 – 560
Rozlišení		16 kanálů na dekádu (32 celkem)
Vzorkovací frekvence	Hz	10
Průtok vzorku	l.min ⁻¹	10
Teplota vzorku	°C	10 – 52
Provozní teplota	°C	0 – 40
Tlak (autokorekce)	kPa	70 – 103
Rozměry (v x š x d)	mm	704 x 343 x 439
Hmotnost	kg	32

Zdroj: [41, upraveno]

Obrázek 20: Spektrometr EEPS 3090

Zdroj: [41]

Viskozimetr SVM 3000

Pro měření hustoty, dynamické a kinematické viskozity zkušebních paliv byl použit Stabinger Viscometer od výrobce Anton Paar. Pro měření byl použit konkrétní model SVM 3000, který je na obrázku číslo 21. Jedná se o univerzální viskozimetr, který umožňuje měření leteckého paliva, nafty, různých maziv nebo také těžkých olejů a ropy s přesností měření pod 1 %. Vybrané technické parametry viskozimetru SVM 3000 jsou uvedené v tabulce 8.

Obrázek 21: Viskozimetr SVM 3000



Zdroj: <http://photos.labwrench.com/equipmentPhotos/1000/1798-1891.jpg>

Tabulka 8: Vybrané parametry viskozimetru SVM 3000

Parametr		SVM 3000
Rozsah teploty	°C	-56 až +105
Rozsah viskozity	mm ² .s ⁻¹	0,2 až 20 000
Rozsah hustoty	g.cm ⁻³	0,65 až 3
Opakovatelnost pro viskozitu	%	0,1
Opakovatelnost pro hustotu	g.cm ⁻³	0,0002
Objem vzorku min. / typický	ml	2,5 / 10
Maximální kapacita měření	vzorků.h ⁻¹	30
Rozměry (š x v x h)	mm	440 x 315 x 220

Zdroj: http://www.metrohmsiam.com/petrochemist/PC_37/SVM_3000.pdf

4 Výsledky

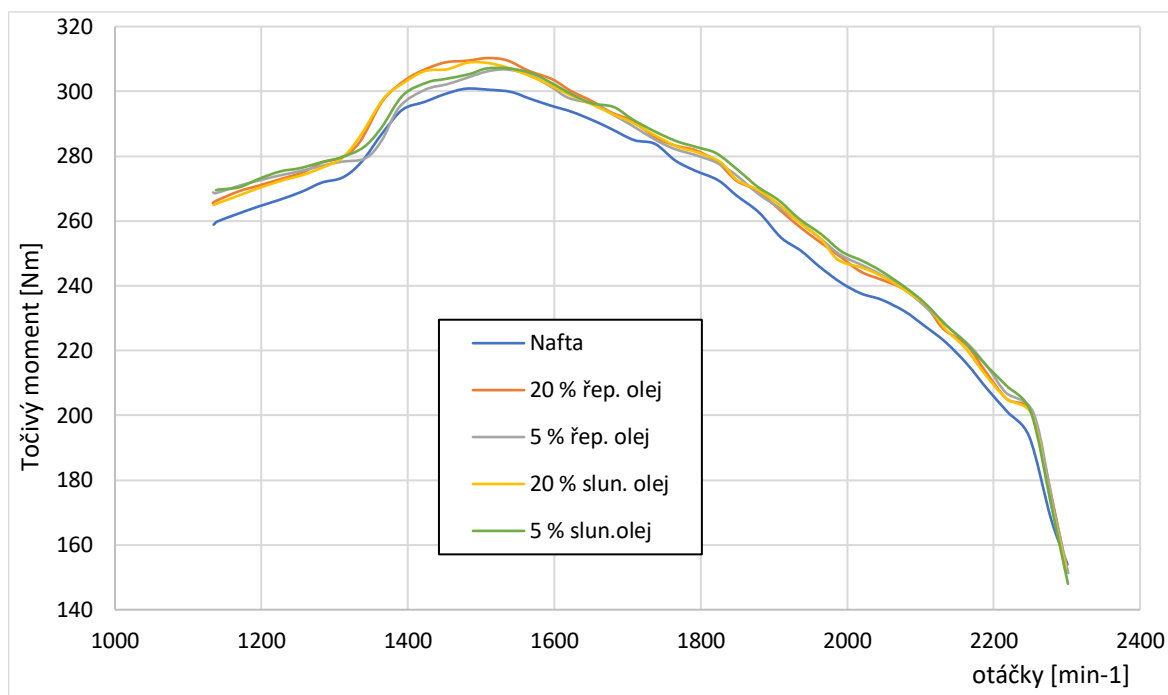
V této kapitole jsou prezentovány vyhodnocené výsledky naměřených dat v rámci experimentální části diplomové práce podle výše uvedené metodiky. Výsledky jsou rozčleněny do podkapitol podle dílčích cílů práce a jsou znázorněny pomocí grafů a tabulek. První podkapitola se zabývá analýzou měření vnější otáčkové charakteristiky motoru traktoru. Druhá podkapitola analyzuje velikost a koncentraci pevných částic produkovaných motorem traktoru. Naměřená data pro všechna zkušební paliva jsou ve třetí podkapitole vzájemně porovnávána, přičemž velký důraz je kladený na porovnání směsných paliv s čistou motorovou naftou.

Z uvedených výsledných hodnot je vybráno palivo, které dosahuje nejnižší produkce pevných částic během celého zkušebního cyklu NRSC a tím také nejvíce přispívá ke snížení dopadu na životní prostředí způsobené provozem vozidel se spalovacími motory v silniční dopravě a zemědělství. K možnému rozšíření této práce a tím dosažení případného dalšího snížení produkce pevných částic je v závěru třetí podkapitoly uvedena krátká diskuze s výsledky jiných autorů.

4.1 Výsledky měření vnější otáčkové charakteristiky motoru

V této podkapitole jsou zobrazeny výsledky vnější otáčkové charakteristiky motoru traktoru Zetor Forterra 8641 při provozu na vybraná zkušební paliva, která jsou zde také rovnou vyhodnocena. Výsledné charakteristiky točivého momentu a výkonu motoru traktoru na všechna zkušební paliva jsou vyneseny do XY bodového grafu s vyhlazenými spojnicemi. Pro větší přehlednost jsou charakteristiky točivého momentu motoru zaznamenány v samostatném grafu na obrázku číslo 22 a charakteristiky výkonu motoru jsou následně uvedeny v samostatném grafu na obrázku číslo 23. Maximální naměřené hodnoty točivého momentu a výkonu motoru traktoru při použití vybraných zkušebních paliv jsou zobrazeny v tabulce 9. V této tabulce je také uveden procentuální pokles nebo nárůst naměřené hodnoty jednotlivých směsných paliv v porovnání s čistou motorovou naftou.

Obrázek 22: Porovnání točivého momentu motoru při provozu na různá paliva

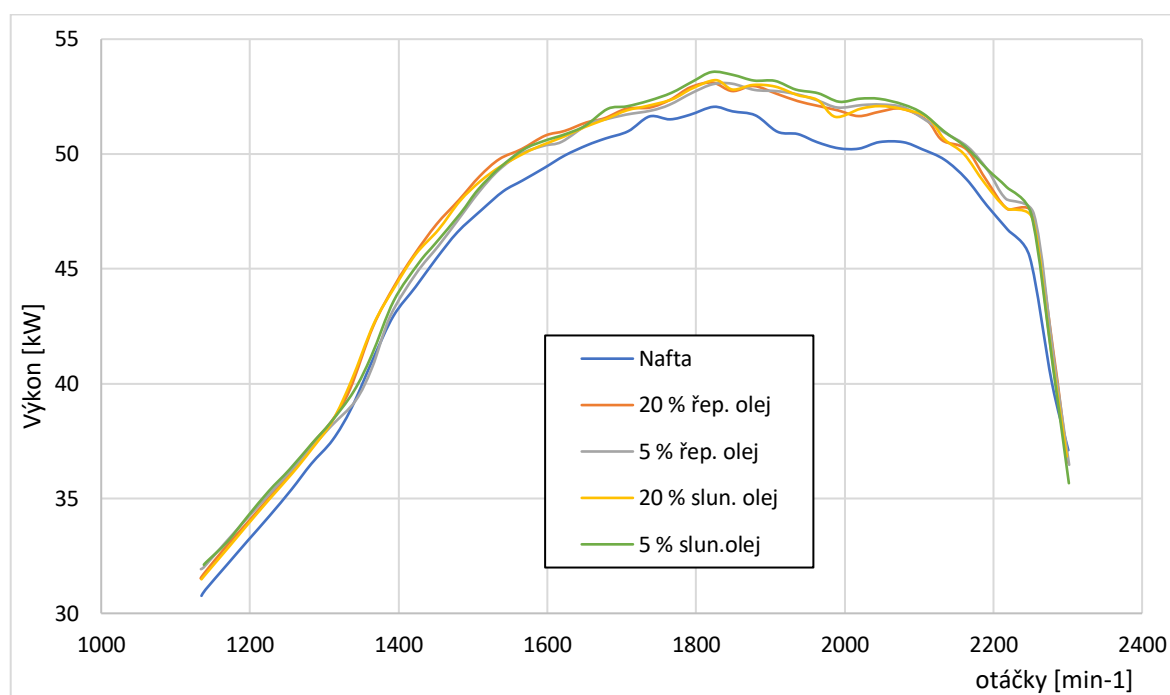


Pro vyhodnocení naměřených výsledků byla čistá motorová nafta zvolena jako porovnávací palivo. S tímto palivem budou jednotlivé směsi motorové nafty a různých rostlinných olejů o různých koncentracích srovnávány. Závislosti točivého momentu motoru na jeho otáčkách při provozu na jednotlivá zkušební paliva jsou vyneseny grafem na obrázku číslo 22. Z tohoto grafu vyplývá, že všechny zkušební palivové směsi motorové nafty s rostlinnými oleji vykazují navýšení točivého momentu motoru traktoru v celém rozsahu otáček. V režimu motoru, kdy se jeho otáčky pohybovaly od 1 300 do 1 500 min⁻¹, mají palivové směsi s 20% podílem řepkového nebo slunečnicového oleje největší navýšení točivého momentu motoru oproti směsím s 5% podílem rostlinných olejů. V těchto otáčkách ovšem motory traktorů pracují velmi často, jelikož jde o oblast s nejvyšším točivým momentem. Mimo tyto otáčky je hodnota točivého momentu motoru pro všechna směsná paliva velmi podobná.

Nejvyšší hodnota maximálního točivého momentu během experimentálního měření byla zaznamenána při provozu motoru traktoru na směsné palivo motorové nafty s 20% podílem řepkového oleje. Tato hodnota činila 310,27 Nm a byla dosažena při otáčkách 1 509 min⁻¹. Ve srovnání s čistou motorovou naftou, která dosahovala během měření nejnižších maximálních hodnot točivého momentu motoru, se jedná o více než 3% nárůst této hodnoty. Maximální točivý moment motoru při provozu na čistou motorovou

naftu dosahoval hodnoty pouze 301 Nm. Maximální hodnoty točivého motoru byly u všech zkušebních paliv dosaženy v úzkém pásmu otáček a to od 1 480 od 1 537 min^{-1} . Zatímco směsná paliva motorové nafty s 5% podílem slunečnicového nebo řepkového oleje dosahovala maximálního točivého momentu na horní hranici tohoto pásma, čistá motorová nafta a směs motorové nafty s 20 % slunečnicového oleje byla na hranici spodní. Zkušební směsné palivo motorové nafty s 20% podílem řepkového oleje dosahovalo maximálního točivého momentu při otáčkách 1 509 min^{-1} , tedy zhruba uprostřed tohoto pásma.

Obrázek 23: Porovnání výkonu motoru při provozu na různá paliva



Závislosti výkonu motoru na jeho otáčkách při provozu na jednotlivá zkušební paliva jsou vyneseny grafem na obrázku číslo 23. Z tohoto grafu je patrné, že všechna zkušební směsná paliva motorové nafty a rostlinných olejů vykazovaly navýšení výkonu motoru ve srovnání s motorovou naftou v téměř celém rozsahu otáček. Největší nárůst výkonu byl zaznamenán v oblasti 1 900 až 2 050 min^{-1} . Hodnoty výkonu v těchto otáčkách při provozu na směsná zkušební paliva byly o 3 až 3,5 % vyšší, než kterých bylo dosaženo na čistou motorovou naftu. Rovnocenný nebo nižší výkon motoru traktoru, než bylo naměřeno na čistou motorovou naftu, byl naměřen pouze při provozu na palivovou směs motorové nafty s 5% podílem řepkového oleje v oblasti 1 300 min^{-1} . Nižší dosažený výkon motoru byl také v oblasti přeběhových otáček (2 300 min^{-1}), zde to ovšem může být způsobené zásahem samotným regulátorem do dávky paliva.

Nejvyššího maximálního výkonu motoru traktoru bylo dosaženo při provozu na směsné palivo motorové nafty s 5% podílem slunečnicového oleje. Tato hodnota, které bylo během měření vnější otáčkové charakteristiky dosaženo při otáčkách $1\,821\text{ min}^{-1}$, činila 53,573 kW. Ve srovnání s čistou motorovou naftou, která dosahovala během měření nejnižších maximálních hodnot výkonu motoru, se jedná o 2,917% nárůst této hodnoty. Nejvyšší výkon motoru při provozu na čistou motorovou naftu dosahoval hodnoty 52 kW. Maximální hodnoty výkonu motoru byly u všech zkušebních paliv dosaženy při téměř shodných otáčkách, tedy v oblasti $1\,822$ až $1\,827\text{ min}^{-1}$. Pouze směsné palivo motorové nafty s 5% podílem řepkového oleje nebylo v tomto intervalu a dosahovalo nejvyššího výkonu motoru při otáčkách $1\,848\text{ min}^{-1}$.

Maximální hodnoty točivého momentu a výkonu motoru traktoru při provozu na jednotlivá zkušební paliva jsou souhrnně uvedeny v tabulce 9. V tabulce jsou dále zaneseny procentuální poměry naměřených hodnot směsných paliv motorové nafty a rostlinných olejů ve srovnání s čistou motorovou naftou. Nárůst hodnot točivého momentu a výkonu motoru traktoru na směsná zkušební paliva motorové nafty a rostlinných olejů mohou být způsobeny rozdílnými fyzikálními a chemickými vlastnostmi rostlinných olejů v porovnání s čistou motorovou naftou. Rozdílné fyzikální vlastnosti představuje zejména vyšší viskozita rostlinných olejů, která již byla zmíněná v kapitole „Metodika práce“, ale také různá objemová stlačitelnost jednotlivých paliv. Tyto vlastnosti by mohly ovlivnit načasování vstřikování nebo rychlost dodávky paliva do motoru traktoru. Odlišné chemické vlastnosti rostlinných olejů v porovnání s motorovou naftou by se mohly projevit v procesu spalování, kdy během hoření směsi motorové nafty a rostlinných olejů může ve válci vznětového motoru docházet k vyšším tlakům. [42], [43], [44]

Tabulka 9: Naměřené maximální hodnoty točivého momentu a výkonu motoru

Zkušební palivo	Toč. moment	Rozdíl	Otáčky	Výkon	Rozdíl	Otáčky
	Nm	%	min^{-1}	kW	%	min^{-1}
Nafta	300,8165	-	1 480	52,054	-	1 824
20 % řep. olej	310,2738	+ 3,144	1 509	53,109	+ 2,026	1 822
5 % řep. olej	306,7457	+ 1,971	1 535	53,065	+ 1,942	1 848
20 % slun. olej	308,8908	+ 2,684	1 482	53,216	+ 2,232	1 827
5 % slun. olej	307,1126	+ 2,093	1 537	53,573	+ 2,917	1 822

Z naměřených vnějších otáčkových charakteristik byly sestaveny měřicí body pro NRSC zkušební cyklus. Určení pozice měřících bodů 1 až 4 a 8 nepředstavoval velké obtíže. Měřicí body 1 až 4 jsou určeny jmenovitými otáčkami motoru traktoru, které jsou předepsány jeho výrobcem. Od sebe jsou jednotlivé body odlišeny pouze zatížením motoru, které je od plného zatížení (tedy 100% zatížení – bod 1), přes 75% zatížení (bod 2) a 50% zatížení (bod3) do 10% zatížení (bod 4). V měřícím bodě 8 má motor traktoru volnoběžné otáčky a není nijak zatěžován. Měřicí body 5 až 7 jsou definované tzv. mezilehlými otáčkami. Tyto otáčky jsou odečteny z vnější otáčkové charakteristiky pro každé palivo zvlášť. Jedná se o otáčky, při kterých motor traktoru dosahuje nevyššího točivého momentu. Jednotlivé body jsou od sebe odlišeny zatížením motoru. Měřicí bod 5 je definován plným zatížením na tyto mezilehlé otáčky, tedy zatížením odpovídající maximálnímu točivému momentu motoru traktoru. V měřících bodech 6 a 7 je jedná o hodnoty 75 a 50 % naměřeného maximálního točivého momentu. Hodnoty mezilehlých otáček odečtených z vnější otáčkové charakteristiky pro jednotlivá zkušební paliva jsou uvedeny v tabulce 10 ve sloupci „Mezilehlé otáčky teoretické“. Tabulka 10 také uvádí skutečnou hodnotu mezilehlých otáček, na které byl motor traktoru během měření těchto bodů nastaven.

Tabulka 10: Stanovení mezilehlých otáček pro NRSC zkušební cyklus

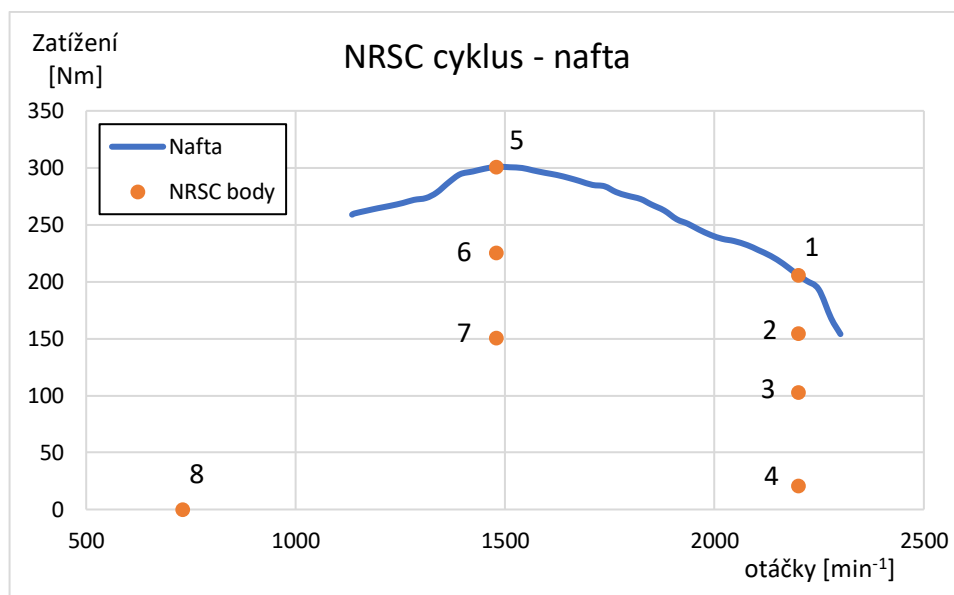
Zkušební palivo	Mezilehlé otáčky teoretické [min^{-1}]	Mezilehlé otáčky skutečné [min^{-1}]
Nafta	1 480	1 537
20 % řep. olej	1 509	1 484
5 % řep. olej	1 535	1 512
20 % slun. olej	1 482	1 500
5 % slun. olej	1 537	1 537

Sestavení měřících bodů pro čistou motorovou naftu je ilustračně znázorněno na obrázku číslo 24. Absolutní hodnoty těchto měřících bodů jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11: Absolutní hodnoty měřících bodů pro čistou motorovou naftu

Měřicí bod		1	2	3	4	5	6	7	8
Otáčky	min^{-1}	2200	2200	2200	2200	1480	1480	1480	730
Zatížení	Nm	206,0	154,5	103,0	20,6	32,1	24,1	16,1	0,0

Obrázek 24: Grafické zobrazení měřících bodů v NRSC cyklu pro motoovou naftu



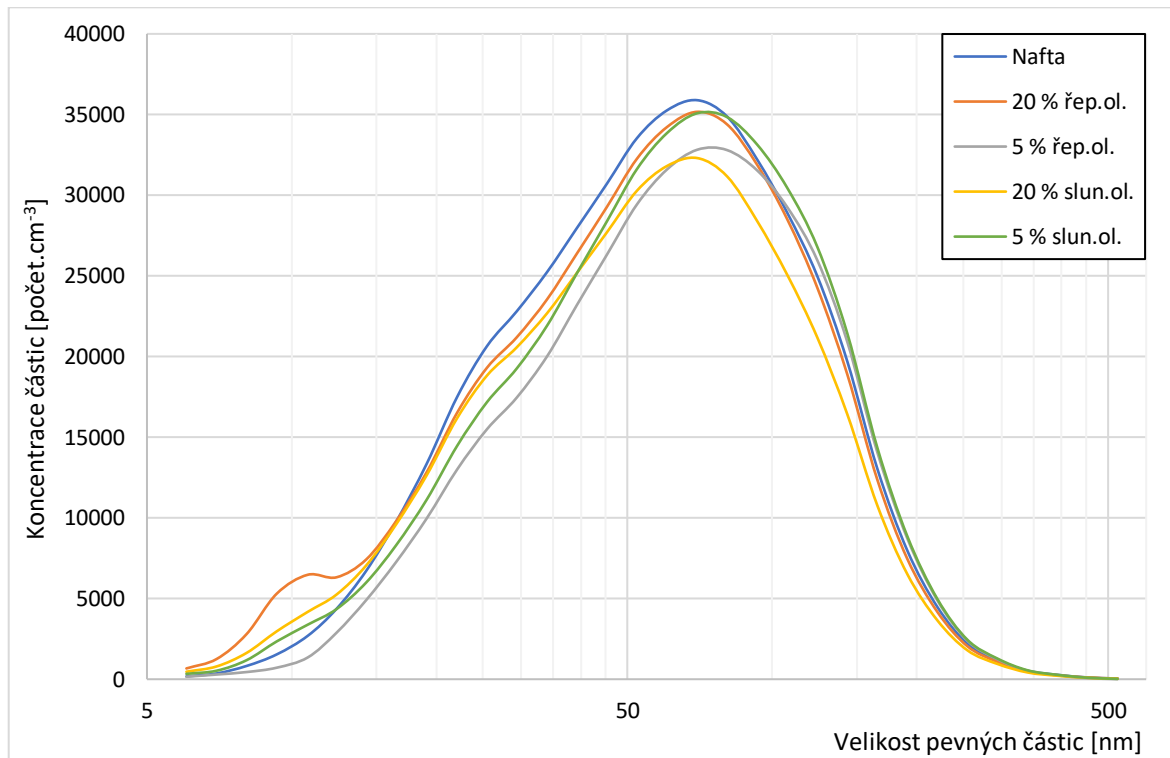
4.2 Výsledky měření vlivu paliv na produkci pevných částic

Měření pevných částic produkovaných vznětovým motorem traktoru na jednotlivá zkušební paliva bylo postupně provedeno ve všech měřících bodech NRSC zkušebního cyklu. Naměřené hodnoty velikosti a koncentrace produkovaných pevných částic na všechna zkušební paliva jsou pro větší přehlednost rozdělena a zobrazena v jednotlivých grafech pro každý měřící bod na obrázcích číslo 25 až 32. Všechny grafy mají pro větší přehlednost vodorovné osy s velikostí pevných částic udávané v logaritmickém měřítku.

Na obrázku číslo 25 jsou zobrazeny naměřené hodnoty velikosti a koncentrace pevných částic všech zkušebních paliv v měřícím bodě 1, který odpovídá plnému zatížení při jmenovitých otáčkách motoru. Z obrázku je patrné, že všechna směsná paliva motorové nafty a rostlinných olejů produkují menší množství pevných částic než čistá motorová nafta v téměř celém spektru jejich velikostí. U většiny zkušebních směsných paliv, s výjimkou směsi s 5% podílem řepkového oleje, byla naměřená hodnota nejmenších částic (do 14,3 nm) vyšší než u čisté motorové nafty. Velikost největšího počtu pevných částic produkovaných čistou motorovou naftou dosahovala hodnoty okolo 69 nm. Téměř všechna směsná paliva, až na směs s 20% podílem slunečnicového oleje, tvořila nejvíce pevných částic ve spektru velikosti přibližně o 10 nm větší v porovnání s čistou motorovou naftou. V oblasti největších velikostí (nad 200 nm) bylo množství pevných částic u všech paliv téměř shodné. Nejmenší

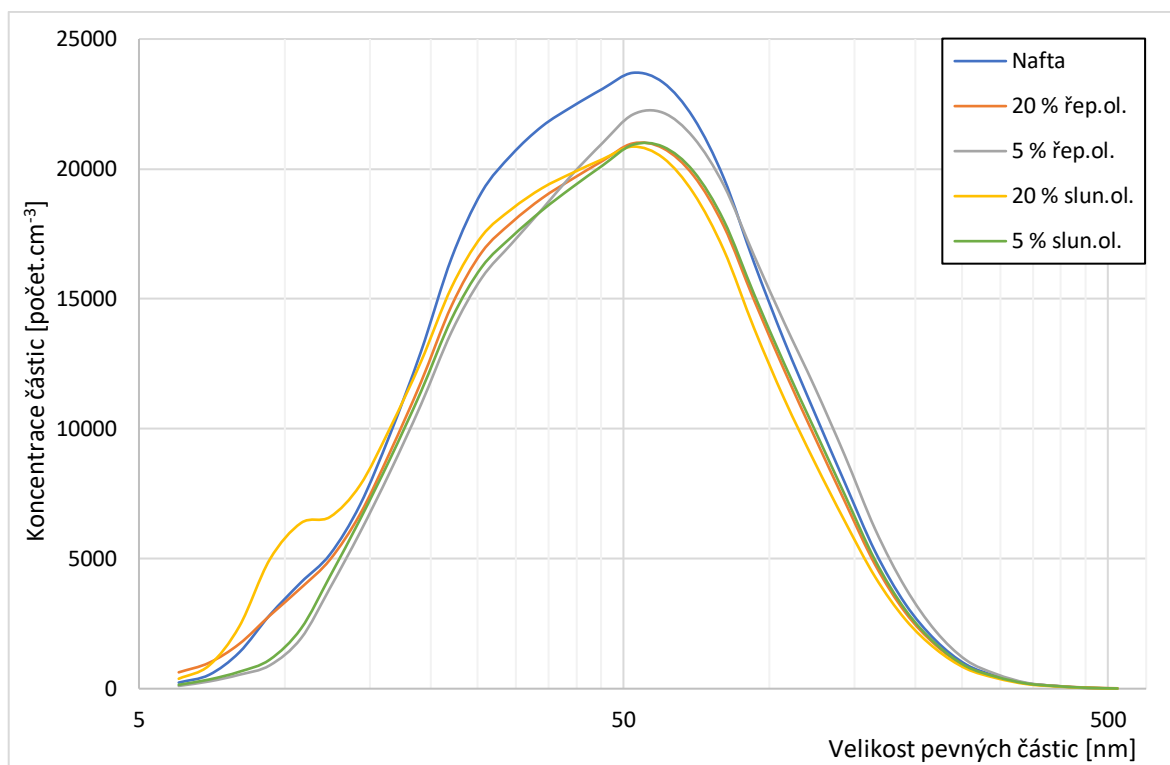
množství pevných částic bylo v měřícím bodě 1 produkováno směsnými palivy motorové nafty s 20% podílem slunečnicového oleje a také 5% podílem řepkového oleje.

Obrázek 25: Produkce pevných částic v měřícím bodě 1

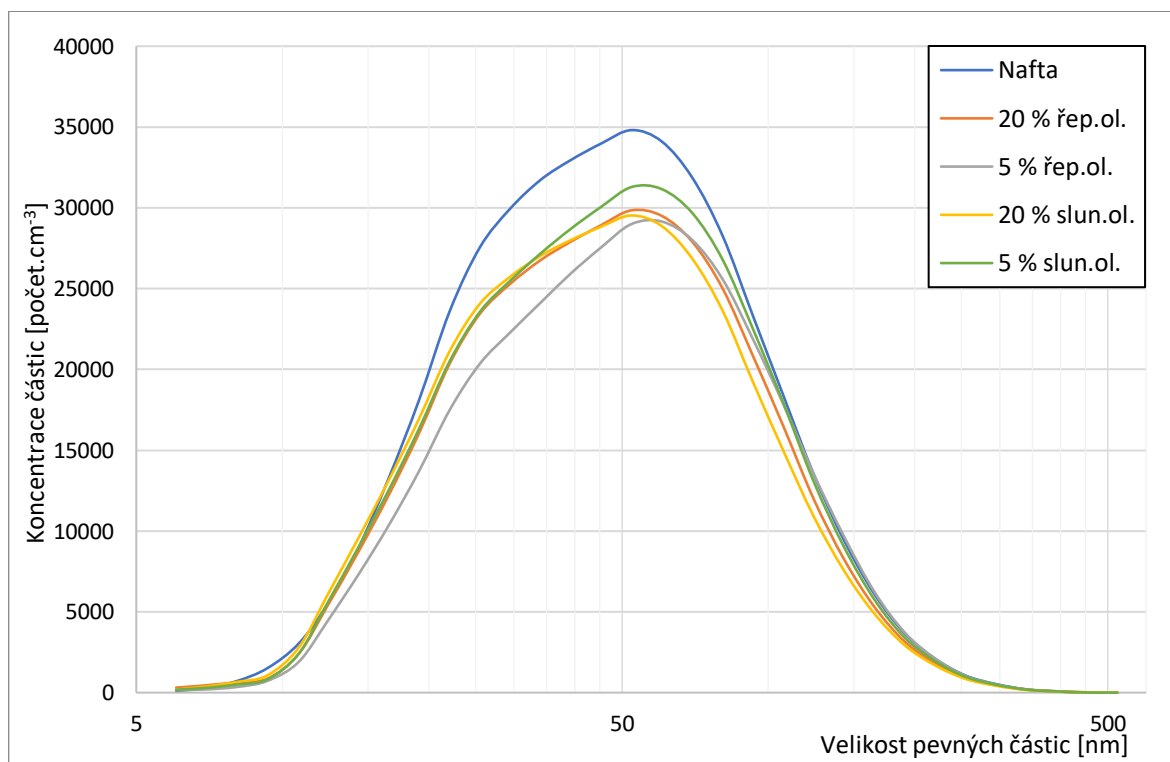


Naměřené hodnoty velikosti a koncentrace pevných částic všech zkušebních paliv v měřícím bodě 2, který odpovídá 75 % maximálního zatížení při jmenovitých otáčkách motoru, je zobrazen grafem na obrázku číslo 26. Z něho je patrné, že počet nejvíce produkováných pevných částic se u všech paliv výrazně snížil v porovnání s měřícím bodem 1. Jejich počet je navíc nejmenší v oblasti jmenovitých otáček motoru. Většina směsných paliv, s výjimkou směsi s 20% podílem slunečnicového oleje, produkovala méně nejmenších pevných částic oproti čisté motorové naftě. Nejvíce vyprodukovaných pevných částic u všech paliv mělo velikost okolo 60,4 nm. Jejich počet byl ovšem pro směsná paliva motorové nafty a rostlinných olejů, s výjimkou směsi s 5% podílem řepkového oleje, nižší o více než 2 500 oproti čisté motorové naftě.

Obrázek 26: Produkce pevných částic v měřícím bodě 2



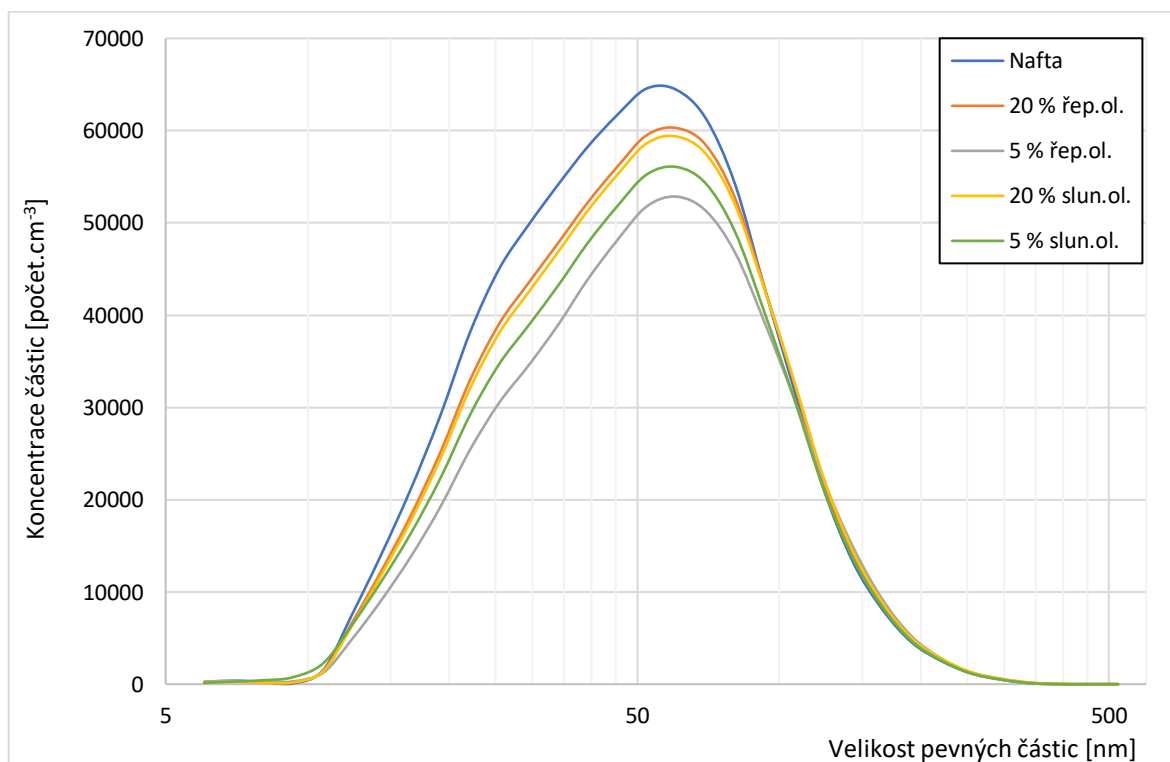
Obrázek 27: Produkce pevných částic v měřícím bodě 3



Z obrázku číslo 27 je patrné, že v měřicím bodě 3, který odpovídá 50 % maximálního zatížení při jmenovitých otáčkách motoru, byl počet nejvíce produkovaných pevných částic jen mírně nižší než v měřicím bodě 1, jejich velikost zde také dosahovala nižší hodnoty, konkrétně v oblasti 52,3 až 60,4 nm. Všechna směsná paliva v tomto měřicím bodě produkovala v porovnání s čistou motorovou naftou menší počet pevných částic. Nejméně vytvořených pevných částic produkoval motor traktoru při provozu na směs motorové nafty s 5% podílem řepkového oleje, kdy jejich počet klesl pod hodnotu naměřenou při provozu motoru na směsi s 20% podílem obou rostlinných olejů.

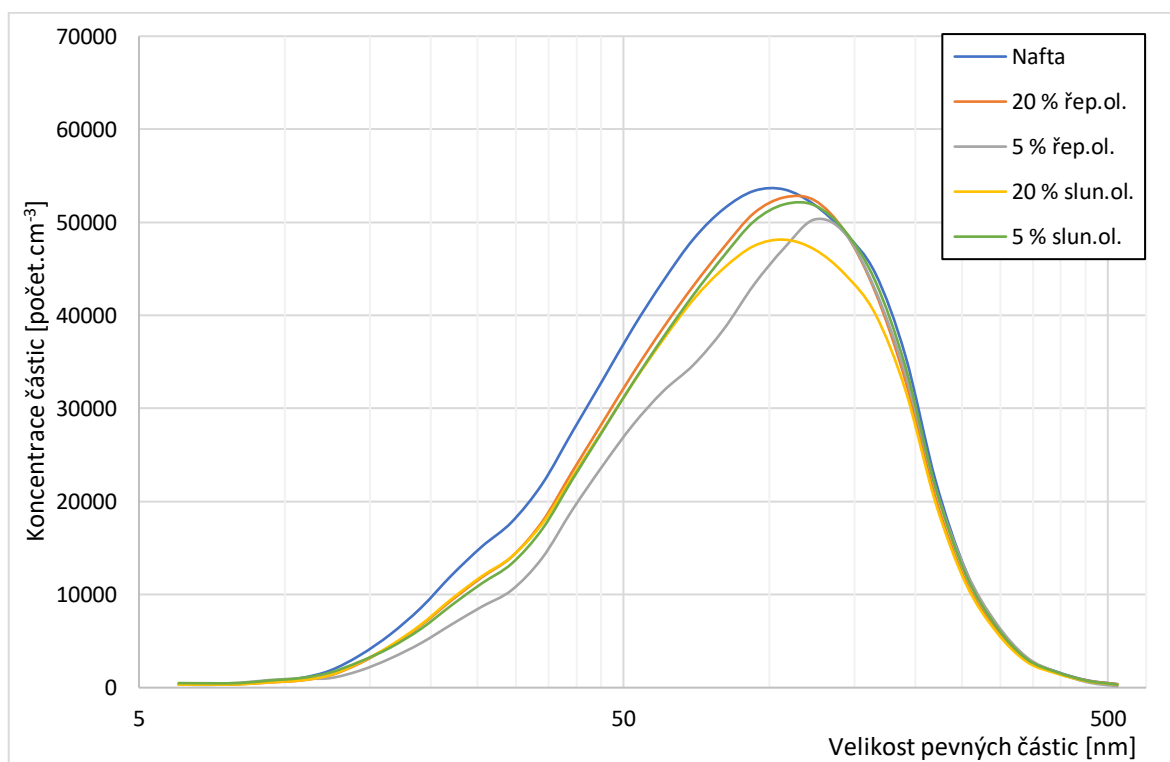
Z obrázku číslo 28 je zřejmé, že naměřené koncentrace nejpočetněji produkovaných pevných částic v měřicím bodě 4, který odpovídá pouze 10 % maximálního zatížení při jmenovitých otáčkách motoru, dosahovala při těchto otáčkách u všech paliv nejvyšších hodnot. Pro čistou motorovou naftu a směs s 5% podílem řepkového oleje se jedná o absolutně nejvyšší hodnotu ve srovnání se všemi body. U všech směsných paliv došlo v porovnání s čistou motorovou naftou ke snížení koncentrace nejvíce produkovaných pevných částic, které dosahovaly velikosti okolo 60,4 nm. Nejlepších výsledků zde dosáhly směsi s 5 % podílem jednotlivých rostlinných olejů. Počet pevných částic na směs s 5 % řepkového oleje byla ovšem ještě o jeden řád nižší než s 5 % slunečnicového oleje.

Obrázek 28: Produkce pevných částic v měřicím bodě 4



Výsledné hodnoty měření při plném zatížení v otáčkách maximálního točivého momentu motoru jsou zobrazeny v grafu na obrázku číslo 29. Z grafu vyplývá, že nejvíce pevných částic vzniklých při provozu na čistou motorovou naftu dosahovalo hodnoty okolo 100 nm. Velikost nejprodukovánějších pevných částic při provozu na směsná paliva, s výjimkou směsi s 20 % slunečnicového oleje, byla ještě větší. Směsi s 20% podílem řepkového oleje a 5% podílem slunečnicového oleje dosahovaly velikosti 124 nm, v případě směsi s 5 % řepkového oleje se jednalo až o velikost 143,3 nm. Všechna směsná paliva produkovala méně pevných částic v porovnání s čistou motorovou naftou již od nejmenších velikostí (14,3 nm) až do velikosti přibližně 220 nm. Nejmenší počet nejprodukovánějších pevných částic bylo tvořeno motorem při provozu na směs s 20 % slunečnicového oleje. V porovnání s plným zatížením motoru při jeho jmenovitých otáčkách (bod 1) se zde jedná o výrazné navýšení koncentrace pevných částic ve výfukových plynech, která se u některých paliv vyrovná s jejich produkcí v měřicím bodě 4.

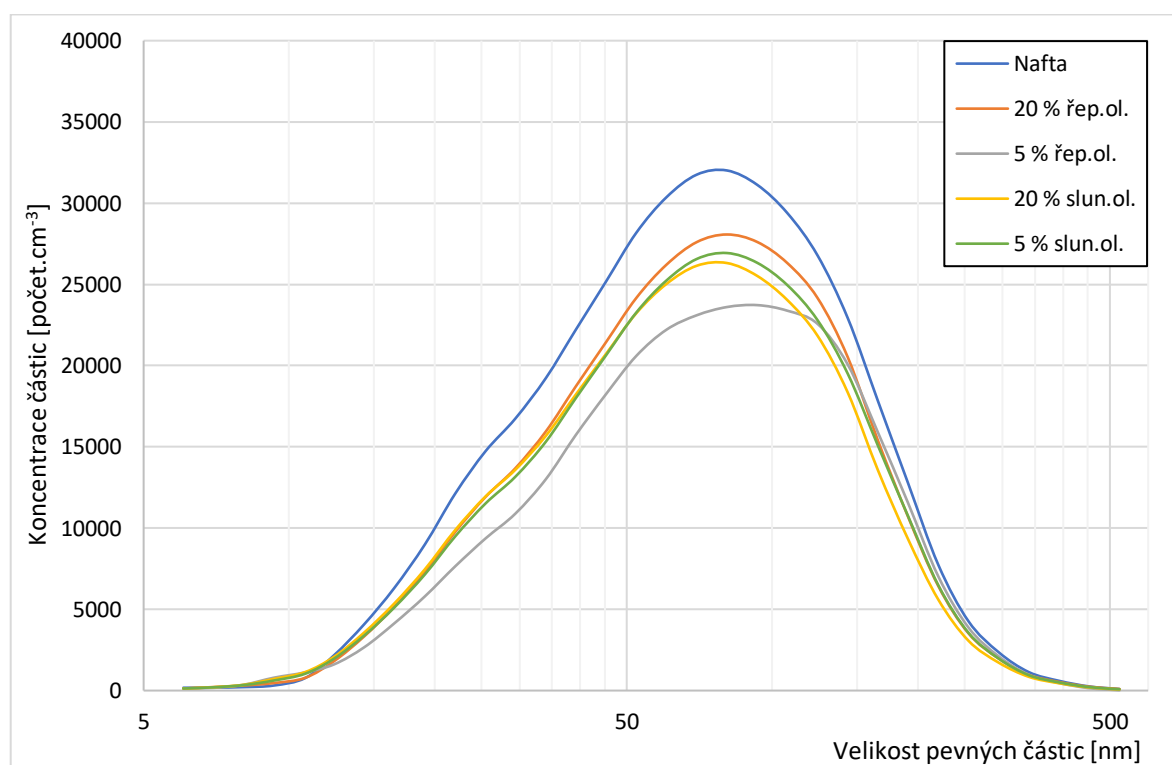
Obrázek 29: Produkce pevných částic v měřicím bodě 5



Na obrázku číslo 30 je uvedený graf naměřených hodnot velikostí a koncentrací pevných částic v měřicím bodě 6, který odpovídá 75 % maximálního zatížení při mezilehlých otáčkách. Oproti hodnotám v měřicím bodě 5 se zde koncentrace u všech

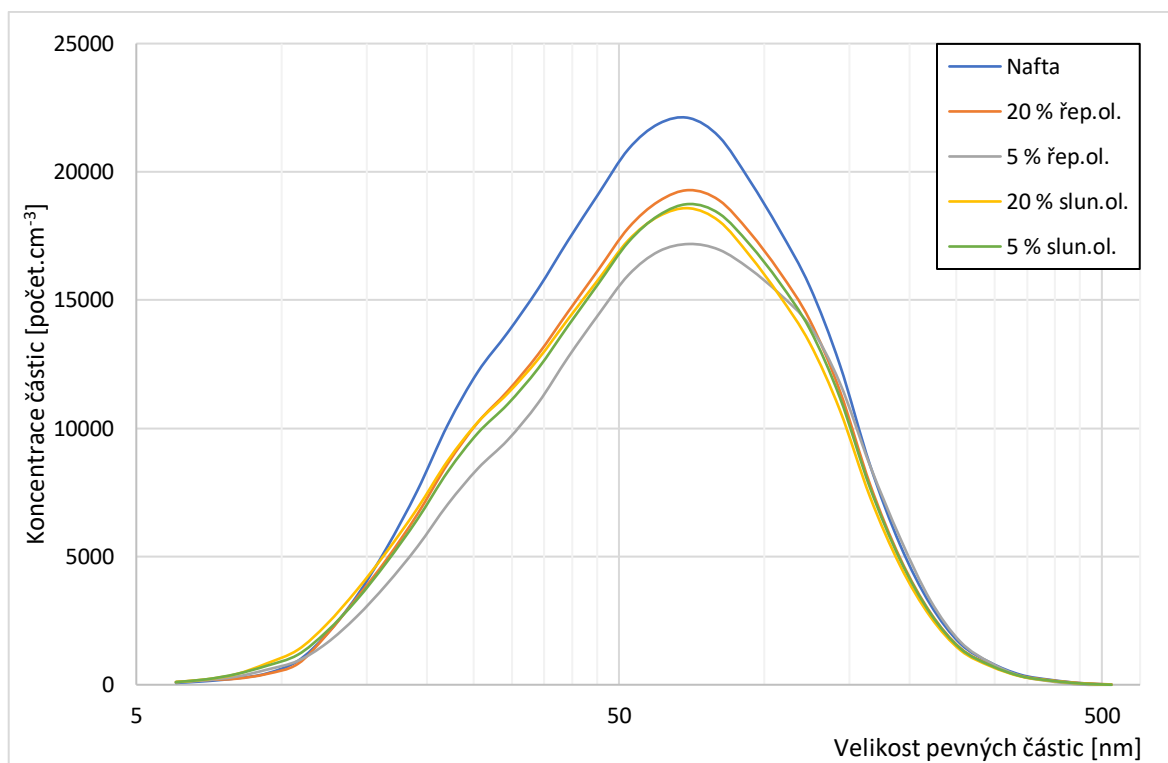
paliv snížily o 40 až 50 %. Při provozu motoru na všechna směsná paliva byla naměřena nižší hodnota koncentrace pevných částic ve srovnání s provozem na čistou motorovou naftu. Výrazně nižší produkce pevných částic dosahovala ve srovnání s ostatními směsnými palivy směs s 5% podílem řepkového oleje. Velikost nejprodukovánějších pevných částic se u většiny paliv, s výjimkou směsi s 5% podílem řepkového oleje, zmenšila na hodnotu 80,6 až 93,1 nm. Nejvíce tvořené pevné částice při provozu na směs s 5% podílem řepkového oleje dosahovaly velikosti 93,1 až 107,5 nm.

Obrázek 30: Produkce pevných částic v měřicím bodě 6



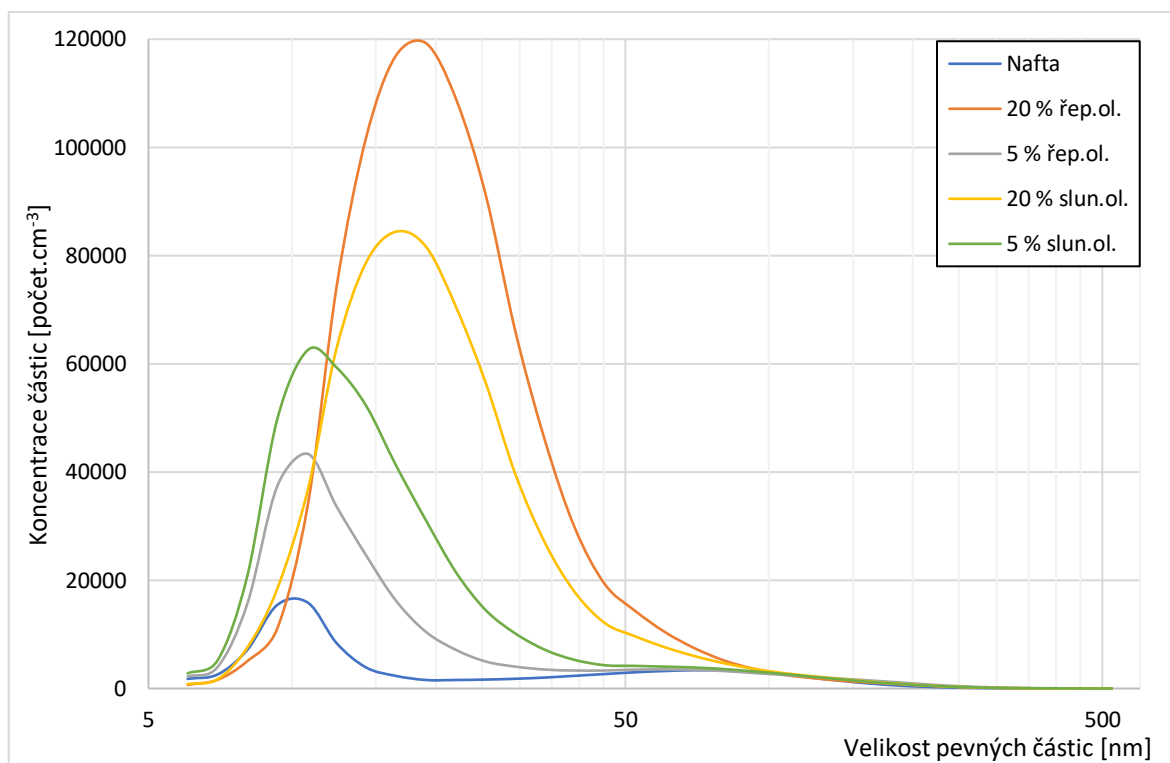
Z grafu na obrázku číslo 31 je patrné, že v měřicím bodě 7, který odpovídá 50 % maximálního zatížení při mezilehlých otáčkách, byla u všech zkušebních paliv naměřena nejnižší koncentrace pevných částic v rámci zkušebního NRSC cyklu, s výjimkou čisté motorové nafty na při provozu motoru na volnoběžné otáčky. Všechna směsná paliva zde produkovala méně pevných částic v porovnání s čistou motorovou naftou. Směs s 5% podílem řepkového oleje zde opět produkuje nejnižší počet pevných částic. Všechna zkušební paliva zaznamenala pokles velikosti nejprodukovánějších pevných částic ve srovnání s hodnotami v měřicím bodě 6, které zde dosahovaly hodnoty 69,8 až 80,6 nm.

Obrázek 31: Produkce pevných částic v měřicím bodě 7



Naměřené hodnoty velikostí a koncentrací pevných částic při volnoběžných otáčkách motoru jsou pro všechna zkušební paliva zobrazeny v grafu na obrázku číslo 32. Z něho je patrné, že při spalování směsných paliv bylo produkováno výrazně větší množství pevných částic, než při provozu motoru na čistou motorovou naftu. Všechna zkušební paliva při volnoběhu tvořila v porovnání s ostatními měřícími body výrazně menší částice. Velikost nejvíce tvořených pevných částic byla okolo 10 nm pro motorovou naftu a přibližně 19 nm pro směsné palivo s 20% podílem řepkového oleje, při jehož spalování byly produkovány největší částice. Při provozu motoru na směsné palivo motorové nafty s 20% podílem řepkového oleje bylo tvořeno až 7,5krát více nejprodukovanějších částic ve srovnání s čistou motorovou naftou. Nejvyšší koncentrace pevných částic jsou zde tvořeny na směsi s 20% podílem rostlinných olejů. Směsi s 5% podílem rostlinných olejů vytvářely menší množství pevných částic v porovnání s 20% podílem rostlinných olejů.

Obrázek 32: Produkce pevných částic v měřícím bodě 8



4.3 Porovnání a vyhodnocení naměřených hodnot

V této podkapitole jsou navzájem porovnány zejména výsledky naměřené koncentrace pevných částic produkovaných jednotlivými zkušebními palivy, jelikož výsledky vnější otáčkové charakteristiky byly shrnuty již v samostatné podkapitole 4.1. Čistá motorová nafta bez přidaných biosložek byla zvolena jako porovnávací palivo, se kterým byla směsná paliva motorové nafty a rostlinných olejů porovnávána.

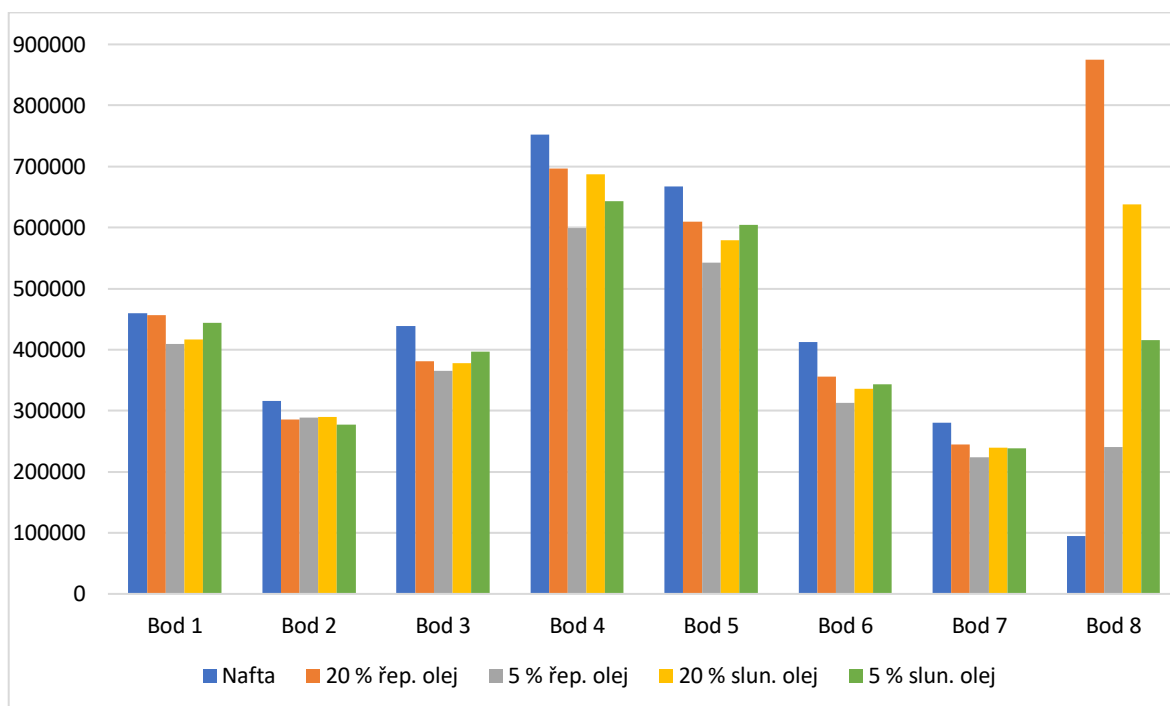
Z předchozích grafů lze vyhodnotit, že spalováním všech směsných paliv motorové nafty a rostlinných olejů bylo ve většině měřících bodů produkováno, ve srovnání s čistou motorovou naftou, menší množství pevných částic zejména v oblasti středně velkých rozměrů. Směsná paliva produkovala pevné částice mírně větší velikosti. Výjimku tvořilo měření při volnoběhu, kde byly tvořeny nejmenší částice, které je schopen měřící přístroj detekovat. Produkce pevných částic na směsná paliva zde byla výrazně vyšší v porovnání s čistou motorovou naftou. Zvýšená produkce při volnoběhu může být ovlivněna horším rozprášením směsných paliv ve spalovacím prostoru motoru způsobeném vyšší viskozitou rostlinných olejů. Určitý vliv může mít také horší odpařovací schopnost rostlinných olejů

oproti motorové naftě. Tomu by odpovídala i vyšší koncentrace produkovaných pevných částic při provozu motoru na paliva s 20% zastoupením rostlinných olejů v porovnání s palivy s 5% obsahem této příměsi.

Při porovnání různých koncentrací řepkového oleje v motorové naftě je patrné, že lepších výsledků dosahovalo směsné palivo s 5% podílem. Méně pevných částic bylo tvořeno při spalování tohoto paliva v sedmi z osmi měřících bodů, výjimku tvořil měřící bod 2. Směsné palivo s 5% podílem řepkového oleje tvořilo v několika měřících bodech pevné částice větší velikosti.

Porovnání různých koncentrací slunečnicového oleje v motorové naftě ukazuje, že v měřících bodech 4 a 8 je produkce pevných částic na směsné palivo s 5% podílem slunečnicového oleje nižší než u paliva s podílem 20 %. V měřících bodech 2 a 7 je koncentrace pevných částic pro obě paliva velmi vyrovnaná. Zatímco v měřících bodech 1, 3, 5 a 6 je počet pevných částic nižší u směsi paliva s 20% podílem slunečnicového oleje. Z toho lze usoudit, že směsné palivo s 20 % řepkového oleje produkuje při větším zatížení motoru menší množství částic. Při středním zatížení motoru jsou výsledky pro obě paliva srovnatelné a při nízkém zatížení motoru tato směs dosahuje horších výsledků.

Obrázek 33: Celkový počet produkovaných pevných částic v 1 cm³ výfukových plynů



Celkový počet pevných částic vyrobených jednotlivými palivy v každém měřícím bodě zkušebního NRSC cyklu je vyneseny ve sloupcovém grafu na obrázku číslo 33. Z tohoto grafu je také zřejmé, že celkové množství pevných částic tvořených při spalování směsných paliv je nižší v porovnání s hodnotami při spalování čisté motorové nafty. To může být způsobené přítomností kyslíku a nižším obsahem uhlíku v rostlinných olejích než v motorové naftě. [43] Jedinou výjimkou bylo měření při volnoběžných otáčkách motoru, kde směsná paliva produkovala více pevných částic v řádech několika stovek procent, jak ukazuje tabulka 12. V tabulce jsou uvedeny procentuální podíly produkce pevných částic při provozu motoru na jednotlivá směsná paliva v porovnání s čistou motorovou naftou.

Tabulka 12: Porovnání celkové produkce pevných částic v 1 cm³ výfukových plynů

Měřicí bod	Váhová konstanta	Nafta	20 % řep. olej	5 % řep. olej	20 % slun. olej	5 % slun. olej
		%	%	%	%	%
1	0,15	0	-0,67	-10,86	-9,37	-3,44
2	0,15	0	-9,84	-8,65	-8,31	-12,30
3	0,15	0	-13,00	-16,70	-13,80	-9,41
4	0,10	0	-7,34	-20,25	-8,63	-14,41
5	0,10	0	-8,63	-18,64	-13,10	-9,35
6	0,10	0	-13,94	-24,21	-18,56	-16,89
7	0,10	0	-12,43	-20,10	-14,44	-14,69
8	0,15	0	+822,08	+154,02	+571,91	+338,61
Vážený průměr		0	+115,55	+9,35	+75,59	+41,49
Vážený průměr (1 – 7)		0	-7,76	-13,75	-10,20	-9,31

Z tabulky je patrné, že u všech směsných paliv docházelo v sedmi z osmi bodů ke snížení množství produkovaných pevných částic. Výrazný nárůst produkce pevných částic při volnoběhu způsobilo, že jejich průměrná produkce byla vyšší než při provozu motoru na čistou motorovou naftu.

Při úvaze, že motor traktoru není příliš často provozován při volnoběžných otáčkách, mohou být výsledné hodnoty v tomto měřícím bodě vyloučeny z výpočtu průměrné produkce pevných částic. V tomto případě bylo zaznamenáno snížení průměrné koncentrace pevných částic při provozu motoru na směsná paliva motorové nafty a rostlinných olejů v rozmezí 7,76 až 13,75 % ve srovnání s provozem na čistou motorovou naftu.

Nejlepších výsledků zde bylo dosaženo při provozu motoru na směsné palivo motorové nafty s 5% podílem řepkového oleje. V jednotlivých měřících bodech, s výjimkou volnoběhu, bylo dosaženo snížení produkce pevných částic v rozmezí 8,65 až 24,21 % v porovnání s provozem motoru na čistou motorovou naftu. Průměrná hodnota produkce pevných částic v bodech 1 až 7 na toto palivo tak dosahovala snížení o 13,75 % v porovnání s čistou motorovou naftou.

Nejhorsí výsledky zde byly zaznamenány při provozu motoru na směs motorové nafty s 20% podílem řepkového oleje. Snížení produkce pevných částic sice bylo zaznamenáno ve většině měřících bodů, s výjimkou volnoběhu, avšak pokles hodnot se pohyboval pouze v rozmezí od 0,67 do 13,94 % ve srovnání s provozem motoru na čistou motorovou naftu. Tím bylo v bodech 1 až 7 dosaženo snížení množství pevných částic na toto zkušební palivo jen o 7,76 % oproti čisté motorové naftě. Při volnoběhu byla produkce více než 9krát vyšší v porovnání s čistou motorovou naftou.

Měrná hodnota koncentrace pevných částic produkovaných vznětovým motorem traktoru za celý NRSC zkušební cyklus byla vypočítaná podle rovnice číslo 12, uvedené v metodice práce. Výsledné měrné hodnoty tohoto výpočtu pro jednotlivá zkušební paliva jsou uvedeny v tabulce 13. Tato tabulka také ukazuje procentuální podíl koncentrace pevných částí při provozu motoru na jednotlivá směsná paliva v porovnání s čistou motorovou naftou.

Tabulka 13: Měrná koncentrace pevných částic za celý NRSC zkušební cyklus

Palivo		Nafta	20 % řep. olej	5 % řep. olej	20 % slun. olej	5 % slun. olej
Měrná hodnota pevných částic	počet.cm ⁻³ .kW ⁻¹	14 754,28	17 626,45	13 020,12	15 746,71	14 562,82
Procentuální podíl	%	0	+19,47	-11,75	+6,73	-1,30

V tabulky vyplývá, že spalováním směsného paliva motorové nafty s 5 % rostlinného oleje byla snížena měrná koncentrace pevných částic produkovaných motorem traktoru za celý NRSC zkušební cyklus v porovnání s provozem motoru na čistou motorovou naftu. Zatímco při provozu motoru na směsné palivo motorové nafty s 20% podílem rostlinných olejů je měrná koncentrace pevných částic vyšší.

Nejlepších výsledků dosahovalo směsné palivo s 5 % řepkového oleje v motorové naftě. Při provozu motoru na toto palivo byla zaznamenána měrná koncentrace pevných částic o hodnotě 13 020,12 počet.cm⁻³.kW⁻¹. To je pokles měrné koncentrace o 11,75 % v porovnání s čistou motorovou naftou. Při provozu motoru na čistou motorovou naftu byla zaznamenána měrná koncentrace o hodnotě 14 754,28 počet.cm⁻³.kW⁻¹.

Nejvyšších hodnot měrné koncentrace pevných částic podle tabulky 13 dosahovalo směsné palivo s 20% podílem řepkového oleje v motorové naftě. Při provozu na toto palivo byla zaznamenána měrná koncentrace pevných částic o hodnotě 17 626,45 počet.cm⁻³.kW⁻¹. Zde se jedná o nárůst měrné koncentrace o necelých 20 % ve srovnání s čistou motorovou naftou.

U směsného paliva s 5% příměsí slunečnicového oleje byl zaznamenán mírný pokles měrné koncentrace pevných částic o 1,3 %, zatímco u směsného paliva s 20% podílem slunečnicového oleje došlo k nárůstu měrné koncentrace pevných částic produkovaných motorem traktoru za celý NRSC zkušební cyklus o 6,73 %.

Diskuze

Přidání řepkového nebo slunečnicového oleje do motorové nafty mělo pozitivní vliv na produkci pevných částic vznětových motorů, kromě provozu na volnoběžné otáčky. Přidáním butanolu do směsného paliva motorové nafty s rostlinným olejem by podle dosavadních vědeckých studií vedlo ke snížení koncentrace pevných částic v měřicím bodě 8 zkušebního NRSC cyklu. [45], [46]

Zvýšení vstřikovacího tlaku paliva nebo jeho předeřtání by podle vydané literatury vedlo také ke snížení koncentrace pevných částic ve všech měřicích bodech při provozu motoru na rostlinné oleje. [5]

Směsná paliva rostlinných olejů a motorové nafty dosahují v porovnání s čistou motorovou naftou vyšších hodnoty točivého momentu a výkonu motoru i přes nižší výhřevnost rostlinných olejů. To může být způsobené vyšší rychlostí šíření tlakové vlny v rostlinných olejích v porovnání s motorovou naftou, a tím k dřívějšímu vstřiku paliva do válce, což má za následek větší dávku paliva. [24]

5 Závěr

Tématem této diplomové práce bylo zjištění produkce pevných částic ve vznětových motorech při provozu na biopaliva. Biosložkou přidanou do motorové nafty byly vybrány rostlinné oleje, které měly snížit koncentraci pevných částic, a tím přispět ke zvýšení ekologie provozu vznětových motorů.

V teoretickém rozboru této diplomové práce, který je rozdělen na tři podkapitoly, je uvedena literární rešerše současného stavu využití biopaliv pro pohon vznětových motorů v silniční dopravě a zemědělství. První část podrobně popisuje vlastnosti, výrobu a vliv na pevné částice paliv pro vznětové motory fosilního i biologického původu. Dále se rozbor zabývá emisemi produkovanými vznětovými motory, popisem jejich vlastností a vzniku. V závěru této kapitoly jsou uvedeny a popsány možnosti měření kouřivosti vznětových motorů.

Praktická část této diplomové práce se zabývá produkcí pevných částic motorem traktoru Zetor Forrtera 8641 a změnou jeho provozních parametrů při spalování pěti vybraných zkušebních paliv. K měření byla namíchána čtyři směsná paliva motorové nafty s 5% a 20% podílem řepkového nebo slunečnicového oleje. Naměřené výsledky byly porovnávány s hodnotami pro čistou motorovou naftu bez jakýchkoli biosložek. Jednotlivá zkušební paliva byla hodnocena podle naměřených výsledků vnější otáčkové charakteristiky motoru traktoru a naměřených koncentrací pevných částic produkovaných během NRSC zkušebního cyklu.

Při měření provozních parametrů motoru traktoru v rámci jeho vnější otáčkové charakteristiky byly zjištěny mírně vyšší hodnoty točivého momentu i výkonu při provozu na všechny palivové směsi v porovnání s naměřenými hodnotami na čistou motorovou naftu. Největšího maximálního točivého momentu dosahoval motor traktoru při provozu na směsné palivo motorové nafty s 20% podílem řepkového oleje. Došlo k navýšení točivého momentu o více než 3 % ve srovnání s hodnotou naměřenou na čistou motorovou naftu. Největší maximální výkon motoru traktoru byl zaznamenán při provozu na směsné palivo motorové nafty s 5% podílem slunečnicového oleje. Došlo k navýšení výkonu o necelé 3 % oproti hodnotě dosažené na čistou motorovou naftu.

Měření produkce pevných částic motorem traktoru probíhalo v rámci jeho zatěžování podle NRSC zkušebního cyklu. Vyhodnocení výsledků naměřených při spalování ukázalo,

že u všech směsných paliv motorové nafty a rostlinných olejů bylo v sedmi z osmi měřících bodů tvořeno menší množství pevných částic ve srovnání s čistou motorovou naftou, zejména v oblasti středně velkých rozměrů. Směsná paliva navíc produkovala pevné částice mírně větší velikosti. Výjimku tvořilo měření při volnoběhu, kdy byla produkce pevných částic 2,5 až 7,5krát vyšší oproti čisté motorové naftě. Nejhorší naměřené výsledky při volnoběžných otáčkách byly zaznamenány na směsné palivo motorové nafty s 20% podílem řepkového oleje.

Následně byla dopočítána celková koncentrace pevných částic v jednotlivých měřících bodech. Také v tomto případě byla zjištěna nižší produkce pevných částic v sedmi z osmi měřících bodů při provozu motoru na směsná paliva v porovnání s hodnotami pro čistou motorovou naftu. Tyto hodnoty byly doloženy procentuálním podílem nárůstu nebo poklesu v jednotlivých měřících bodech oproti hodnotám pro čistou motorovou naftu. Váženým průměrem procentuálních podílů všech měřících bodů byl zjištěný nárůst celkové produkce pevných částic všemi směsnými palivy o 9,35 až 115,55 % ve srovnání s hodnotou pro čistou motorovou naftu. Vážený průměr byl ovlivněn vysokou hodnotou koncentrace pevných částic při volnoběhu. V tomto režimu motor traktoru není příliš často provozován, proto byl také vypočten vážený průměr pouze z hodnot pro měřící body 1 až 7. Výsledkem byl naopak pokles průměrné koncentrace pevných částic při provozu motoru na směsná paliva motorové nafty a rostlinných olejů v rozmezí 7,76 až 13,75 % ve srovnání s provozem na čistou motorovou naftu. Nejlepších výsledků zde bylo dosaženo při provozu motoru na směsné palivo motorové nafty s 5% podílem řepkového oleje.

Dále byla vypočtena měrná hodnota koncentrace pevných částic pro jednotlivá paliva za celý NRSC zkušební cyklus. Paliva s 5% příměsí rostlinných olejů vykazovala pokles měrných hodnot, zatímco obě paliva s 20% příměsí dosáhly horších výsledků ve srovnání s čistou motorovou naftou. Nejlepší výsledek byl dosažen u směsného paliva s 5 % řepkového oleje v motorové naftě, kdy došlo k poklesu měrné koncentrace o 11,75 % v porovnání s čistou motorovou naftou.

Z naměřených hodnot je patrné, že přidání rostlinných olejů do motorové nafty má pozitivní vliv na snížení koncentrace pevných částic produkovaných vznětovým motorem, s výjimkou volnoběhu. Při provozu na směsná paliva také došlo ke zvýšení točivého momentu a výkonu motoru přibližně o 2-3 %.

6 Seznam použitých zdrojů

- [1] HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [2] HÖNIG, VLADIMÍR. *Paliva a maziva* [online]. [cit. 2018-10-11]. Dostupné z: <http://oppa-smad.tf.czu.cz/?q=pm>
- [3] POSPÍŠIL, M., J. ŠIŠKA a G. ŠEBOR. *Biobutanol jako pohonná hmota v dopravě*. biom.cz [online]. 2008 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: <http://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/biobutanol-jako-pohonn-hmota-v-doprav.pdf>
- [4] TRYNER, Miroslav. *E5 a B7. Na českých pumpách se objeví nové značení paliva*. EURO [online]. 2018 [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <https://www.euro.cz/byznys/e5-a-b7-na-ceskych-pumpach-se-objevi-nove-znacen-paliva-1318678>
- [5] ŠMERDA, Tomáš, Jiří ČUPERA a Martin FAJMAN. *Vznětové motory vozidel: biopaliva, emise, traktory*. Brno: CPress, 2013. Auto-moto-profi (CPress). ISBN 978-80-264-0160-5
- [6] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1
- [7] HROMÁDKO, Jan, Jiří HROMÁDKO, Vladimír HÖNIG a Martin CINDR. *TECHNOLOGIE VÝROBY BIOPALIV DRUHÉ GENERACE*. Chem. Listy 104, 784-790 (2010) [online]. 2009 [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2010_08_784-790.pdf
- [8] VANĚK, Václav. *Obnovitelné zdroje: Biopaliva druhé a třetí generace*. TŘÍPÓL [online]. 2012 [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: <http://www.3pol.cz/cz/rubriky/obnovitelne-zdroje/987-biopaliva-druhe-a-treti-generace>

- [9] VLK, František. *Alternativní pohony motorových vozidel*. Brno: František Vlk, 2004. ISBN 8023916025.
- [10] HROMÁDKO, Jan: Využití etanolu ve vznětových motorech. *Biom.cz* [online]. 2010-05-12 [cit. 2019-03-24]. Dostupné z WWW: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-etanolu-ve-vznetovych-motorech>. ISSN: 1801-2655.
- [11] DIBUSZ, Kryštof. *Výroba bioethanolu z cukrové řepy* [online]. VŠCHT Praha [cit. 2018-10-19]. Dostupné z: <http://kubusz.net/Bioethanol/technologie.html>
- [12] HROMÁDKO, Jan, HROMÁDKO, Jiří, MILER, Petr, HÖNIG, Vladimír a ŠTĚRBA, Pavel. *Využití bioethanolu jako palivo ve spalovacích motorech: Chem. Listy 105, 122-128* (2011) [online]. 2009 [cit. 2018-10-15]. Dostupné z: http://chemicke-listy.cz/docs/full/2011_02_122-128.pdf
- [13] SLADKÝ, Václav: *Biobutanol – vhodnější náhrada benzínu*. *Biom.cz* [online]. 2007-07-04 [cit. 2018-10-21]. Dostupné na: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/biobutanol-vhodnejsi-nahrada-benzinu>. ISSN: 1801-2655
- [14] TRINDADE, Wagner Roberto da Silva a Rogério Gonçalves dos 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, 642-651 [cit. 2018-10-21]. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.213. ISSN 13640321
- [15] JIN, Chao, Mingfa YAO, Haifeng LIU, Chia-fon F. LEE a Jing JI. *Progress in the production and application of n-butanol as a biofuel. Renewable* [online]. 2011, 15(8), 4080-4106 [cit. 2018-10-21]. DOI: 10.1016/j.rser.2011.06.001. ISSN 13640321
- [16] GOGA, Geetesh, Bhupendra Singh CHAUHAN, Sunil Kumar MAHLA a Haeng Muk CHO. *Performance and emission characteristics of diesel engine fueled with rice bran biodiesel and n-butanol. Energy Reports* [online]. 2019, 5, 78-83 [cit. 2019-03-22]. DOI: 10.1016/j.egy.2018.12.002. ISSN 23524847. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352484718303202>

- [17] 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), 578-597 [cit. 2018-10-26]. DOI: 10.1016/j.rser.2009.10.003. ISSN 13640321.
- [18] ŠEBOR, G., M. POSPÍŠIL a J. ŽÁKOVEC. *Technicko – ekonomická analýza vhodných alternativních paliv v doprav* [online]. 2006 [cit. 2018-10-21]. Dostupné na: https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/technickoekonomicka_analyza_vhodnych_alternativnich_paliv_v_doprave.pdf
- [19] SIRVIÖ, K., S. NIEMI, V. VAUHKONEN a E. HILTUNEN. Antioxidant studies for animal-based fat methyl ester. *Agronomy Research*. 2014, **12**(2).
- [20] GIAKOUMIS, Evangelos G., Constantine D. RAKOPOULOS, Athanasios M. DIMARATOS a Dimitrios C. RAKOPOULOS. *Exhaust emissions of diesel engines operating under transient conditions with biodiesel fuel blends. Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2012, 38(5), 691-715 [cit. 2019-03-22]. DOI: 10.1016/j.pecs.2012.05.002. ISSN 03601285. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360128512000342>
- [21] POKORNÝ, Zdeněk. *BIONAFTA: Ekologické alternativní palivo do vznětových motorů*. 1. vyd. Nové Město nad Cidlinou: Institut výchovy a vzdělávání Ministerstva zemědělství České republiky, 1998. ISBN 80-7105-173-X
- [22] 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
- [23] MASJUKI, H. H., M. A. KALAM, M. A. MALEQUE, A. KUBO a T. NONAKA. *Performance, emissions and wear characteristics of an indirect injection diesel engine using coconut oil blended fuel. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* [online]. 2005, 215(3), 393-404 [cit. 2019-03-24]. DOI: 10.1243/0954407011525728. ISSN 0954-4070. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1243/0954407011525728>

- [24] VOJTÍŠEK, Michal. *Dopad spalování rostlinných olejů ve vznětových motorech na výfukové emise*. *Biom.cz* [online]. 2011 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z WWW: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/dopad-spalovani-rostlinnych-oleju-ve-vznetovych-motorech-na-vyfukove-emise>. ISSN: 1801-2655
- [25] BEROUN, Stanislav. *Spalovací proces ve válci pístového spalovacího motoru – Výfukové emise*. Technická univerzita v Liberci, 2002
- [26] TAKÁTS, Michal. *Měření emisí spalovacích motorů*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01632-3
- [27] ZHANG, Dongzhi, Junfeng WU a Yuhua CAO. *Cobalt-doped indium oxide/molybdenum disulfide ternary nanocomposite toward carbon monoxide gas sensing*. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2019, 777, 443-453 [cit. 2019-01-28]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.10.365. ISSN 09258388. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838818340647>
- [28] *Carbon Monoxide and Health Effects*. *Engineering ToolBox* [online]. 2005 [cit. 2019-01-28]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/carbon-monoxide-d_893.html
- [29] 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 [cit. 2019-01-29], **109**. Dostupné z: doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.02.077
- [30] RHEAD, M.M. a S.A. HARDY. *The sources of polycyclic aromatic compounds in diesel engine emissions*. *Fuel* [online]. 2003 [cit. 2019-01-29], **82**(4). Dostupné z: doi:10.1016/S0016-2361(02)00314-9
- [31] DITTRICH, Lukáš. *Emise: čím jsou nebezpečné? (první část)*. *ZAVOLANTEM* [online]. 2008 [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <https://www.zavolantem.cz/emise-cim-jsou-nebezpecne-prvni-cast/>

- [32] SAJDL, Jan. *Emise výfukových plynů*. *Autolexicon.net* [online]. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/emise-vyfukovych-plynu/>
- [33] KOTEK, Martin. *Emise motorových vozidel*. *Diagnostika motorových vozidel* [online]. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: https://moodle.czu.cz/pluginfile.php/849664/mod_resource/content/0/pr_3_emise.pptx
- [34] MUNACK, A., Y. Ruschel, O. Schröder, J. Krahl, *Messung ultrafeiner Partikel im Abgas von Dieselmotoren beim Betrieb mit Biodiesel* [online]. 2007 [cit. 2019-01-31]. Dostupné z: https://www.agqm-biodiesel.de/application/files/5313/2869/8912/Bericht_Feinstpartikel_dt-engl.pdf
- [35] *Polétavý prach – neviditelná hrozba*. *Hluk & Emise* [online]. 2007 [cit. 2019-01-31]. Dostupné z: <http://hluk.eps.cz/hluk/emise/poletavy-prach-%E2%80%93-neviditelná-hrozba/>
- [36] PEXA, Martin. *Produkce emisních složek výfukových plynů – zážehové a vznětové motory*. *Technická diagnostika* [online]. [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: https://moodle.czu.cz/pluginfile.php/849566/mod_resource/content/0/6_emise.pdf
- [37] PEXA, Martin, Karel KUBÍN. *Vliv podílu biosložky v palivu na spotřebu a paliva emise traktoru Zetor Forterra 8641*. [*The Influence of Proportion of Biofuel in Diesel on Fuel Consumption and Emissions Production of Zetor Forterra 8641 tractor*]. *Agritech Science*, [online], 2010, roč. 4, č. 3, článek 3, s. 1-5. Dostupný z WWW: <www.agritech.cz >. ISSN 1802-8942
- [38] *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 97/68/ES ze dne 16. prosince 1997 o sblížení právních předpisů členských států týkajících se opatření proti emisím plynných znečišťujících látek a znečišťujících částic ze spalovacích motorů určených pro nesilniční pojízdné stroje*. In: *Úřední věstník Evropské unie*. 1997. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:31997L0068&from=EN>

- [39] *Návod k obsluze a údržbě. ZETOR 8641 Forterra Turbo* [online]. 2004. [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: http://www.cals.cz/zetorservice/files/1/Forterra_Z_8641-Z11741_CZ.pdf
- [40] *LPS ZW-500 - MAHA Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co KG*. [online]. 2017. [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <http://www.maha.co.uk/power-take-off-dynamometer-lps-zw-500.htm>
- [41] *ENGINE EXHAUST PARTICLE SIZER SPECTROMETER MODEL 3090. TSI Incorporated* [online]. 2015 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <http://www.tsi.com/engine-exhaust-particle-sizer-spectrometer-3090/>
- [42] ČEDÍK, Jakub, Martin Pexa, Michal Holůbek, David Mader a Radek Prazan. *Effect of sunflower and rapeseed oil on production of solid particles and performance of diesel engine*. *Agronomy Research*. 2018. 16. 985-996 [cit. 2019-03-13]. DOI: 10.15159/AR.18.121
- [43] Shah, P. R., & Ganesh, A. *A comparative study on influence of fuel additives with edible and non-edible vegetable oil based on fuel characterization and engine characteristics of diesel engine*. *Applied Thermal Engineering*. 2016. 102, 800–812.
- [44] Shah, P. R., Gaitonde, U. N., & Ganesh, A. *Influence of soy-lecithin as bio-additive with straight vegetable oil on CI engine characteristics*. *Renewable Energy*. 2018. 115, 685–696.
- [45] PEXA, M., J. ČEDÍK a R. PRAŽAN. *Smoke and NOx emission of combustion engine using biofuels*. *Agronomy Research*. 2016, 14(2), 547-555. ISSN 1406-894X.
- Hönig, V., L. Smrčka, R. Ilves a A. Küüt. *Adding biobutanol to diesel fuel and impact on fuel blend parameters*. *Agronomy Research*. 2015. **13**(5), 1227–1233

7 Seznam obrázků

Obrázek 1: Potenciální pokles produkce emisí CO ₂ biopalivy 1. a 2. generace.....	4
Obrázek 2: Výroba bioethanolu z biomasy obsahující jednoduché sacharidy	8
Obrázek 3: Výroba bioethanolu z biomasy obsahující škrob	9
Obrázek 4: Výroba bioethanolu z biomasy obsahující lignocelulózu.....	10
Obrázek 5: Výroba biobutanolu z biomasy modifikovanou ABE fermentací.....	13
Obrázek 6: Základní reakční schéma transesterifikace triglyceridů	16
Obrázek 7: Výroba methylesteru řepkového oleje	16
Obrázek 8: Výroba rostlinného oleje za tepla.....	18
Obrázek 9: Složení emisí vznětových motorů	20
Obrázek 10: Produkce emisí vznětových motorů v závislosti na λ	21
Obrázek 11: Závislost koncentrace oxidu uhelnatého na expozičním čase.....	23
Obrázek 12: Distribuce PM podle velikosti do lidského těla	27
Obrázek 13: Schéma konstrukce opacimetru pro měření kouřivosti	29
Obrázek 14: Měření kouřivosti filtrační metodou – přístroj Bosch	30
Obrázek 15: Měření kouřivosti hmotnostní koncentrací částic	31
Obrázek 16: Plnoprůtokový tunel pro měření koncentrace částic	32
Obrázek 17: Uspořádání stanoviště k měření	34
Obrázek 18: Ukázkové znázornění vnější otáčkové charakteristiky motoru.....	36
Obrázek 19: Zkušební cyklus NRSC.....	38
Obrázek 20: Spektrometr EEPS 3090	41
Obrázek 21: Viskozimetr SVM 3000.....	42
Obrázek 22: Porovnání točivého momentu motoru při provozu na různá paliva	44
Obrázek 23: Porovnání výkonu motoru při provozu na různá paliva	45
Obrázek 24: Grafické zobrazení měřících bodů v NRSC cyklu pro motoovou naftu	48

Obrázek 25: Produkce pevných částic v měřicím bodě 1.....	49
Obrázek 26: Produkce pevných částic v měřicím bodě 2.....	50
Obrázek 27: Produkce pevných částic v měřicím bodě 3.....	50
Obrázek 28: Produkce pevných částic v měřicím bodě 4.....	51
Obrázek 29: Produkce pevných částic v měřicím bodě 5.....	52
Obrázek 30: Produkce pevných částic v měřicím bodě 6.....	53
Obrázek 31: Produkce pevných částic v měřicím bodě 7.....	54
Obrázek 32: Produkce pevných částic v měřicím bodě 8.....	55
Obrázek 33: Celkový počet produkováných pevných částic v 1 cm ³ výfukových plynů	56

8 Seznam tabulek

Tabulka 1: Srovnání vybraných parametrů benzínu, nafty, bioethanolu a biobutanolu .	11
Tabulka 2: Srovnání vybraných parametrů mot. nafty, MEŘO a řepkového oleje	15
Tabulka 3: Změřená hustota a viskozity zkušebních paliv	35
Tabulka 4: Parametry pro zkušební cyklus NRSC.....	38
Tabulka 5: Technické údaje traktoru Zetor Forterra 8641	40
Tabulka 6: Technické parametry dynamometru Maha LPS-ZW 500	41
Tabulka 7: Vybrané parametry spektrometru EEPS 3090.....	41
Tabulka 8: Vybrané parametry viskozimetru SVM 3000	42
Tabulka 9: Naměřené maximální hodnoty točivého momentu a výkonu motoru.....	46
Tabulka 10: Stanovení mezilehlých otáček pro NRSC zkušební cyklus	47
Tabulka 11: Absolutní hodnoty měřicích bodů pro čistou motorovou naftu	47
Tabulka 12: Porovnání celkové produkce pevných částic v 1 cm ³ výfukových plynů...	57
Tabulka 13: Měrná koncentrace pevných částic za celý NRSC zkušební cyklus.....	58