

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů



Diplomová práce

HVO jako palivo pro spalovací motory

Bc. Pavel Srdínko

© 2022 ČZU v Praze

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Pavel Srdínko

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

Název práce

HVO jako palivo pro spalovací motory

Název anglicky

Hydrotreated vegetable oil as a fuel for combustion engines

Cíle práce

Cílem diplomové práce je na základě literárního rozboru zvolit vhodnou směs paliva s hydrogenovaným olejem (HVO) a tuto směs prakticky porovnat ve vznětovém spalovacím motoru s klasickou motorovou naftou a to z pohledu výkonových parametrů, emisí a spotřeby paliva.

Metodika

Praktická část práce bude realizována na zvoleném spalovacím motoru, který bude zatížen dynamometrem, na němž bude použit vhodný zatěžovací cyklus, během nějž budou sledovány výkonové parametry, emise a spotřeba paliva.

Osnova:

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu (analýza používaných druhů biopaliv, biopaliva I., II. A III. generace)
3. Cíl práce
4. Metodika práce
5. Výsledky (měření spotřeby paliva, emisí a výkonových parametrů motoru s motorovou naftou a směsí HVO, zpracování a porovnání výsledků)
6. Závěr

Doporučený rozsah práce

50-60

Klíčová slova

biopaliva, hydrogenovaný olej, emise, spotřeba paliva

Doporučené zdroje informací

HALDERMAN, J. D. – LINDER, J. *Automotive fuel and emissions control systems* James D. Halderman, Jim Linder. Upper Saddle River, N.J.: Pearson/Prentice Hall, 2006. ISBN 013110442.

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

Předpisy, periodika a firemní literatura

SCRAGG, A. H. – C.A.B. INTERNATIONAL, ISSUING BODY. *Biofuels : production, application and development*. Wallingford, Oxfordshire, UK: CABI, 2009. ISBN 9781845935924.

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

Předběžný termín obhajoby

2020/2021 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů

Elektronicky schváleno dne 25. 11. 2019

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 2. 2020

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 05. 04. 2021

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „HVO jako palivo pro spalovací motory“ vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne 1. 4. 2022

Pavel Srdínko

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval mému vedoucímu práce panu doc. Ing. Martinu Pexovi, Ph.D., za odbornou pomoc, vedení a cenné rady při zpracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli odborné materiály a rady. Mé poděkování patří také všem, kdo se podíleli na experimentálních měřeních prezentovaných v této diplomové práci a bez nichž by tato práce nemohla vzniknout.

HVO jako palivo pro spalovací motory

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou použití hydrogenovaného oleje jako paliva pro spalovací motory. Cílem této práce je na základě literárního rozboru zvolit vhodnou směs paliva s obsahem hydrogenovaného oleje a tuto směs prakticky porovnat ve vznětovém spalovacím motoru s klasickou motorovou naftou, a to z pohledu výkonových parametrů, emisí a spotřeby paliva. Úvodní část práce pojednává o důvodech pro využívání biopaliv, problémech spojených se současně používanými biopalivy a přínosech, které by mohlo používání hydrogenovaných rostlinných olejů jako paliva přinést. Teoretická část práce vychází zejména z odborné literatury a odborných článků. Jsou zde popsány pojmy biomasa a biopaliva, rozdělení biopaliv na základě skupenství a tzv. generací, ale také nejčastěji používání biopaliva v zážehových a vznětových motorech. Největší prostor je v této části práce věnován zejména teoretickým poznatkům o FAME a HVO. Další část práce představuje cíle a metodiky práce. V praktické části práce jsou zkoumány konkrétní vlivy testovaných palivových směsí na provozní parametry, spotřebu paliva a produkci emisí ve výfukových plynech. V závěrečné části jsou poté zhodnoceny poznatky vyplývající z provedených experimentálních měření a literárního rozboru.

Klíčová slova: biopaliva, hydrogenovaný rostlinný olej, emise, spotřeba paliva

Hydrotreated vegetable oil as a fuel for combustion engines

Abstract

The thesis deals with the use of hydrogenated oil as a fuel for internal combustion engines. The objective of this thesis is to select a suitable fuel blend containing hydrogenated oil based on literature analysis and to compare this blend in a compression ignition engine with conventional diesel fuel in terms of performance parameters, emissions, and fuel consumption. The introductory part of the thesis discusses the reasons for the use of biofuels, the problems associated with currently used biofuels and the benefits that the use of hydrogenated vegetable oils as fuel could bring. The theoretical part of the thesis is mainly based on scientific literature and articles. It describes the concepts of biomass and biofuels, the classification of biofuels based on states of matter and so-called generation, as well as the most used biofuels in petrol and diesel engines. Most of the space in this part of the thesis is devoted to the theoretical knowledge of FAME and HVO. The next part of the thesis is devoted to the introduction of the objective and methodology of the work. In the practical part of the thesis, the specific effects of the tested fuel blends on the operating parameters, fuel consumption and exhaust emission production are investigated. In the final part, the findings from the experimental measurements and literature analysis are evaluated.

Keywords: biofuels, hydrotreated vegetable oil, emissions, fuel consumption

Obsah

1 Úvod	1
2 Rozbor současného stavu.....	3
2.1 Biopaliva a biomasa.....	3
2.2 Rozdělení biopaliv	4
2.2.1 Rozdělení podle skupenství	4
2.2.1.1 Kapalná biopaliva.....	4
2.2.1.2 Plynná biopaliva.....	4
2.2.2 Rozdělení podle generací.....	5
2.2.2.1 Biopaliva I. generace.....	5
2.2.2.2 Biopaliva II. generace	6
2.2.2.3 Biopaliva III. generace	8
2.2.2.4 Biopaliva IV. generace.....	9
2.3 Biopaliva pro zážehové motory	9
2.3.1 Bioetanol.....	11
2.3.1.1 Výroba bioetanolu	11
2.3.1.2 Vlastnosti bioetanolu jako paliva	11
2.3.1.3 Použití bioetanolu pro zážehové motory	12
2.3.2 Biobutanol.....	13
2.3.2.1 Výroba biobutanolu.....	14
2.3.2.2 Vlastnosti biobutanolu jako paliva.....	14
2.3.2.3 Použití biobutanolu pro zážehové motory.....	15
2.3.3 Biometanol.....	16
2.3.3.1 Výroba biometanolu	16
2.3.3.2 Vlastnosti biometanolu jako paliva	17
2.3.3.3 Použití biometanolu pro zážehové motory.....	18
2.4 Biopaliva pro vznětové motory	19
2.4.1 Alkoholy jako palivo ve vznětových motorech	19
2.4.1.1 Použití bioetanolu pro vznětové motory	19
2.4.1.2 Použití biobutanolu ve vznětových motorech	20
2.4.1.3 Použití biometanolu ve vznětových motorech	21

2.4.2	Využití rostlinných olejů a produktů z nich vyrobených ve vznětových motorech	22
2.4.3	Metylestery mastných kyselin	23
2.4.3.1	Výroba FAME.....	25
2.4.3.2	Vlastnosti FAME jako paliva.....	27
2.4.3.3	Použití FAME ve vznětových motorech	28
2.4.4	Hydrogenovaný rostlinný olej (HVO)	30
2.4.4.1	Výroba HVO	31
2.4.4.2	Vlastnosti HVO jako paliva	33
2.4.4.3	Použití HVO ve vznětových motorech.....	34
2.4.4.4	Vliv HVO na provozní parametry vznětového motoru.....	35
3	Cíl práce	38
4	Metodika práce.....	39
4.1	Testované palivové směsi	39
4.2	Použité vybavení a měřicí aparatura.....	40
4.3	Postup měření	43
5	Výsledky měření.....	46
5.1	Výkonové parametry motoru.....	46
5.2	Spotřeba paliva	48
5.3	Emise oxidu uhličitého (CO ₂).....	49
5.4	Emise oxidu uhelnatého (CO)	50
5.5	Emise oxidů dusíku (NO _x).....	51
5.5.1	Emise oxidu dusnatého (NO).....	53
5.5.2	Emise oxidu dusičitého (NO ₂)	55
5.5.3	Emise oxidu dusného (N ₂ O)	56
5.6	Pevné částice.....	57
6	Závěr	62
7	Seznam použitých zdrojů	64
	Seznam obrázků.....	72
	Seznam tabulek	72
	Seznam grafů.....	73

1 Úvod

Společně s narůstajícím množstvím automobilů se zvyšuje i spotřeba fosilních paliv. Emise vzniklé jejich spalováním mají negativní dopad jak na lidské zdraví, tak na životní prostředí. Z tohoto důvodu rostou snahy o využívání obnovitelných zdrojů jako pohonných hmot. Jednou z možných alternativ k fosilním palivům jsou i biopaliva. Hlavní surovinou pro výrobu biopaliv pro vznětové motory je rostlinný olej, kromě něho lze však použít i upotřebené fritovací oleje, živočišné tuky a v neposlední řadě se také diskutuje a rozvíjí využití olejů z řas. V čisté podobě našly jako palivo pro spalovací motory jen okrajové uplatnění. Ve formě bionafty jsou však v současné době dominantním alternativním palivem pro pohon vznětových motorů. Bionaftou se označuje směs metylesterů mastných kyselin (FAME – fatty acid methyl ester) vyráběných transesterifikací výše zmíněných surovin. Chemickou podstatu fosilní motorové nafty vyrobené z ropy tedy tvoří směs uhlovodíků, zatímco chemickou podstatu bionafty tvoří metylestery mastných kyselin [1; 2].

Bionafta má však oproti běžné motorové naftě řadu nevýhod vyplývajících právě z její chemické povahy. Lehce nižší výhřevnost tohoto paliva je přitom nedostatek pouze minoritní. Kromě agresivního působení bionafty na některé elastomery je také rizikem hydrolyza v přítomnosti vody. Při hydrolyze vznikají volné mastné kyseliny způsobující korozi kovových materiálů. Voda kromě korozních účinků rovněž zvyšuje riziko mikrobiálního napadení, vůči kterému je bionafta méně rezistentní než ropné palivo. Největším problémem bionafty však jednoznačně zůstává její nízká oxidační stabilita způsobená přítomností dvojných vazeb v řetězcích nenasycených mastných kyselin vázaných v jejich molekulách. Kromě látek s nižší molekulovou hmotností oproti původním molekulám bionafty (aldehydy, alkoholy a karboxylové kyseliny) jsou výslednými produkty oxidace bionafty i látky s vyšší molekulovou hmotností. Nerozpustné vysokomolekulární látky vytvářejí pryskyřičnaté úsady. Ty mohou částečně nebo zcela ucpat části palivového systému (např. palivový filtr, vstřikovače, přívod paliva do čerpadla apod.) a vytvářet nerozpustné úsady na horkých površích motoru. Bionafta navíc vždy v menší či větší míře proniká do klikové skříně motoru, kde její oxidační produkty mohou způsobit rychlé znehodnocení motorového oleje [2].

I přes výše uvedené nevýhody je bionafta v současné době nejpoužívanějším alternativním diesellovým palivem. Mnohem kvalitnější diesellové palivo oproti klasické bionaftě je však možné vyrobit z rostlinných olejů jejich hydrogenací. Získaný produkt tímto procesem má několik výhod oproti bionaftě. Hydrogenace poskytuje bezkyslíkaté produkty, ty mají lepší oxidační stabilitu a vyšší cetanové číslo než produkty transesterifikace. Dalším

benefitem je možnost provozování hydrogenace spolu se zpracováním ropných surovin. Nevýhodou jsou horší nízkoteplotní vlastnosti, ty se však dají odstranit následnou hydroizomerací. Oproti bionaftě se dají rostlinné oleje zpracované pomocí hydrogenace přimíchávat do motorové nafty ve velkém poměru, a tím lze zvýšit možnost použití obnovitelných zdrojů jako paliv [1; 2].

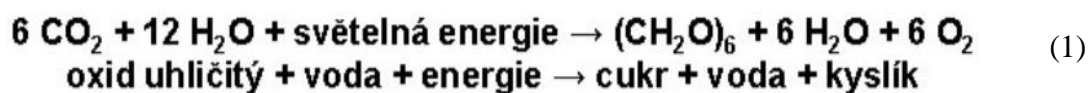
2 Rozbor současného stavu

Tato část práce je rozdělena do několika kapitol a zabývá se literárním rozbohem současného stavu řešené problematiky. Jsou zde vysvětleny pojmy biomasa a biopaliva. Následuje rozdělení biopaliv podle různých kritérií a popis jejich využití pro zážehové a vznětové motory. Zvláštní pozornost je poté věnována metylesterům mastných kyselin a hydrogenovanému rostlinnému oleji.

2.1 Biopaliva a biomasa

Biopaliva se používají jako alternativní nebo doplňková paliva pro spalovací motory. Lze je také využívat ve směsích s klasickými palivy na bázi ropy. Směrnice 2009/28/ES o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů a o změně a následném zrušení směrnic 2001/77/ES a 2003/30/ES je definuje jako „kapalné nebo plynné palivo používané pro dopravu vyráběné z biomasy“. Biopaliva jsou považována za uhlíkově neutrální zdroj energie, neboť CO₂, který je při jejich spalování uvolňován, byl z atmosféry díky fotosyntéze odstraněn nedávno, takže jejich příspěvek ke zvyšování koncentrace CO₂ v atmosféře je považován za nulový. Základním předpokladem biopaliv je tedy jejich vstupní surovina, kterou je biomasa [3].

Biomasa je jedním z nejstarších zdrojů využívané energie, samotná však palivem není. Vyhláška č. 252/2000 Sb. ji definuje jako rostlinný materiál, který je možné využít jako palivo pro její energetický obsah. Představuje výsledek přeměny fotosyntetické konverze solární energie a oxidu uhličitého do chemických a fyzikálních složek rostlinného materiálu (viz chemická rovnice 1). Stává se tak mechanismem uchování energie a umožňuje naakumulovanou solární energii uvolnit [3; 4].



Jedná se tedy o organickou hmotu rostlinného nebo živočišného původu, která pochází ze zemědělství, lesnictví, potravinářského průmyslu, výroby papíru a dalších odvětví pracujících s organickou hmotou. Biomasu je také možné získávat jako odpadní produkt ze zemědělské a průmyslové činnosti, či z komunálního odpadu a může být využívána jak k výrobě obnovitelných paliv s menší zátěží na životní prostředí, než mají klasická paliva, ale i k přímému spalování [3; 4].

2.2 Rozdělení biopaliv

Biopaliva lze dělit podle mnoha kritérií, např.: použití, zpracování, produkce atd. Nejčastějším rozdělením biopaliv je však rozdělení podle skupenství a podle generací na základě surovin využitých k jejich výrobě. Jednotlivé generace se také liší v technologii výroby, rozšíření a v ekologickém přínosu [5].

2.2.1 Rozdělení podle skupenství

2.2.1.1 Kapalná biopaliva

Kapalná biopaliva jsou taková biopaliva, která se při svém skladování, přepravě a použití nachází v kapalném stavu. Mezi tato paliva jsou řazena alkoholová biopaliva, kam patří například bioetanol neboli etanol vyráběný z rostlin obsahujících větší množství škrobu a sacharidů, nejčastěji z kukuřice, brambor, obilí, cukrové řepy a cukrové třtiny. Další zástupce alkoholových biopaliv je biometanol, ten je vyráběn zejména ze dřeva a jeho zbytků. Butanol, řazený také do této kategorie paliv, se vyrábí fermentací biomasy a lze ho použít přímo v zážehových motorech z důvodu menší korozivnosti oproti etanolu [6].

Jako další zástupce kapalných biopaliv lze uvést biooleje, které nacházejí využití ve vznětových motorech (rostlinný olej, bionafta). Bionafta je získávána transesterifikací rostlinných olejů a živočišných tuků [3].

Do kategorie kapalných biopaliv lze zařadit také zkapalněná plynná paliva, která lze přeměnit na kapalné uhlovodíky, např. bioplyn nebo dřevoplyn. Na rozdíl od bioetanolu a bionafty je možné k výrobě využít celou plodinu, to zvyšuje celkový energetický výnos [7].

2.2.1.2 Plynná biopaliva

Plynná biopaliva jsou taková biopaliva, která se při svém skladování, přepravě a použití nachází v plynném stavu. Nejvýznamnějším palivem z této kategorie je bezpochyby biometan. Jedná se o bioplyn, jenž je zbaven CO_2 a obsahuje 98 % metanu. Bioplyn lze získat z přirozených zdrojů, jako jsou sedimenty a mokřady, ale také z odpadů v hospodářství, jakými jsou například skládky odpadů nebo čističky odpadních vod. Biometan má stejné chemické složení jako zemní plyn (CNG – Compressed natural gas). Rozdíl mezi nimi je dán způsobem vzniku. Vznik zemního plynu je zapříčiněn postupným rozkladem organické hmoty bez přístupu vzduchu za vysokého tlaku po dobu mnoha miliónů let. Zemní plyn lze nalézt v podzemních nalezištích společně s ropou nebo černým uhlím. Na trhu s automobily lze

v současné době nalézt vozy, které jsou poháněny pomocí CNG, tedy i pomocí biometanu, který je svým složením se zemním plynem shodný [7; 8].

2.2.2 Rozdělení podle generací

2.2.2.1 Biopaliva I. generace

I. generace biopaliv, označovaná pojmem tradiční biopaliva, se vyrábí fermentací cukrů a škrobů nejčastěji na bioetanol, nebo jsou to přímo oleje a tuky, či jejich úprava transesterifikací na bionaftu. Jako vstupní suroviny používá potravinářské plodiny, jakými jsou například škrobnaté plodiny, obilí, cukrová řepa, cukrová třtina nebo obilí. Tato biomasa je neefektivněji pěstována v tropických regionech, kde lze nalézt dostatek úrodné půdy a vhodné přírodní podmínky. Z důvodu nízkého ocenění životního prostředí může však v těchto regionech docházet k nahrazení přírodních ekosystémů plantážemi určenými převážně k pěstování cukrové třtiny. To vede k negativním dopadům na kyselost půdy, používání umělých hnojiv a pesticidů a ztrátě biodiverzity. Tyto negativní jevy mohou převýšit jejich výhody. To spolu se zvyšováním cen potravin dělá tato biopaliva neoblíbená, přestože biopaliva první generace se dají také vyrábět z organických zbytků a nepoužitelné biomasy z potravinářského průmyslu [9; 10].

Mezi biopaliva I. generace patří např.:

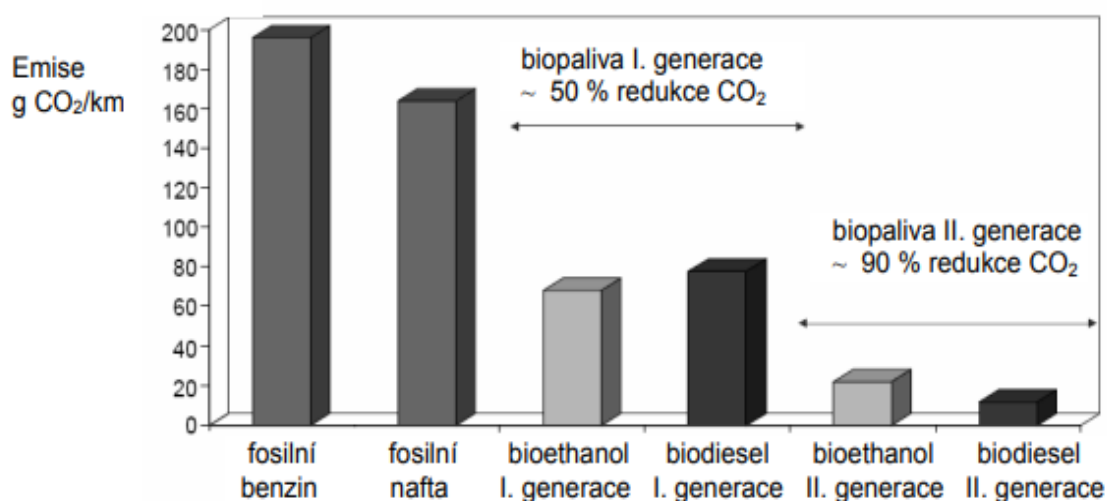
- MEŘO (metyléster řepkového oleje), případně jiného oleje nebo živočišného tuku (obecně označované jako bionafta),
- bioetanol vyráběný z výchozích produktů, které obsahují cukr nebo škrob,
- BioETBE (bioethyltercbutylether) vyráběn adiční reakcí bioetanolu s isobutanem,
- rostlinný olej (v našich klimatických podmínkách se jedná zejména o řepkový olej) [9].

I přes popsané nevýhody této generace biopaliv jsou stále nejpoužívanější. Evropská unie však plánuje snižování jejich užívání a podpory. EASAC (Europeans Academies' Science Advisory Council) došla totiž k závěru, který tvrdí, že v případě, kdy jsou započítány všechny dopady na pěstování biomasy, tak biopaliva I. generace, na rozdíl od biopaliv II. generace, způsobují zanedbatelné nebo žádné snížení emisí skleníkových plynů. Z toho důvodu je dle návrhu Evropské komise plánováno omezení biopaliv z potravinářských plodin. V současné době Evropská unie stanovuje 7 % strop pro I. generaci biopaliv spotřebovaných v dopravě, zároveň podíl těchto paliv na konečné spotřebě energie v odvětvích silniční a železniční

dopravy v daném členském státě nesmí být vyšší o více než o jeden procentní bod, než byl v roce 2020. Pro členské státy s podílem těchto paliv nižším než 1 %, může být tento podíl zvýšen maximálně na 2 %. Tím by mělo dojít k rozvoji pokročilých biopaliv, tzv. biopaliv II. generace v zájmu směrnice o dosažení cíle Směrnice o energiích z obnovitelných zdrojů [11; 12].

2.2.2.2 Biopaliva II. generace

Biopaliva II. generace, označovaná jako biopaliva pokročilá, se od biopaliv I. generace liší druhem biomasy použité pro jejich výrobu a vlivem na životní prostředí. Nevyrábí se z potravinářských plodin, ale z nepotravinářské lignocelulosové biomasy (dřevo, sláma, seno, těžební zbytky, rychle rostoucí dřeviny, rostlinné odpady atd.). Oproti biopalivům I. generace mají vyšší obsah energie, lepší kvalitu, lepší kompatibilitu s pohonnými hmotami na ropné bázi a vyšší pozitivní rozdíl v saldu produkce CO₂ během životního cyklu (analýza Life Cycle Assessment). Mají potenciál snížit emise CO₂ až o 90 % ve srovnání s fosilními palivy (viz obrázek 1) [9].



Obrázek 1 Potenciál biopaliv I. a II. generace na snížení emisí CO₂ [9]

Nevýhodou této generace biopaliv jsou především vyšší náklady v důsledku přeměny polysacharidů na jednoduché cukry, což je finančně náročné. Z důvodu podstatně nižších nákladů na vstupní suroviny lze však předpokládat, že s rozvojem technologií dojde ke snížení nákladů na investice a provoz až na úroveň fosilních paliv, což bude motivací k masivnější výrobě těchto environmentálně příznivých paliv. Podle nové směrnice Evropského parlamentu a Rady o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů z roku 2018 by nejpozději v roce 2030 měl činit podíl energie z obnovitelných zdrojů na konečné spotřebě energie v odvětví

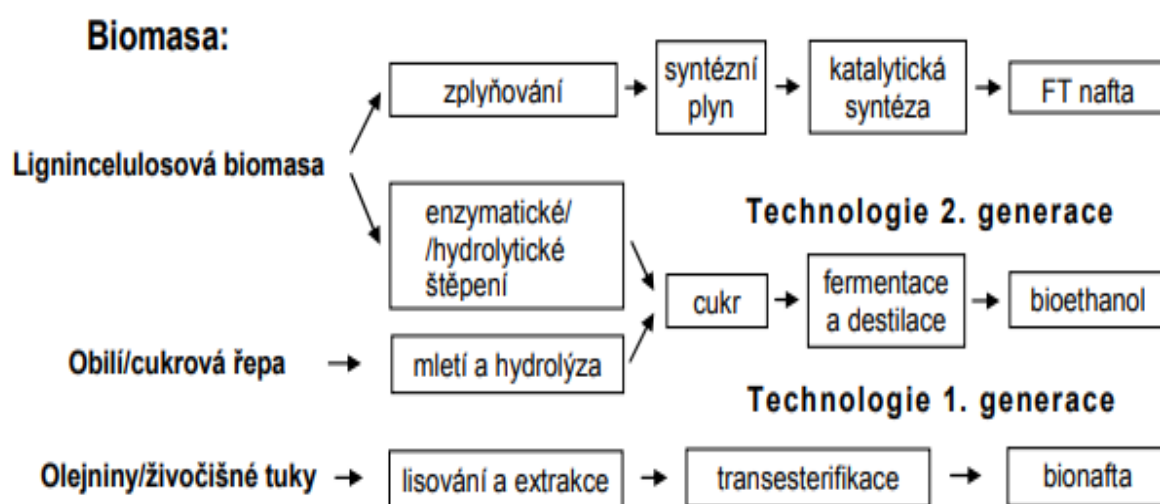
dopravy alespoň 14 %. V rámci toho minimálního podílu musí příspěvek pokročilých biopaliv a bioplynu na konečné spotřebě energie v odvětví dopravy představovat v roce 2022 alespoň 0,2 %, v roce 2025 alespoň 1 % a v roce 2030 alespoň 3,5 % [9; 12].

Mezi biopaliva II. generace patří např.:

- bioetanol vyráběný z lignocelulosové biomasy,
- syntetická motorová nafta jako produkt Fischerovy Tropšovy syntézy,
- biometanol jako produkt katalytické konverze syntézního plynu,
- biodimethylether jako produkt katalytické konverze syntézního plynu,
- biovodík jako produkt katalytické konverze syntézního plynu [9].

Biopaliva II. generace, jak již bylo zmíněno, se nevyrábí z potravinářských plodin, nekonkurují tedy rostlinám na výrobu potravin, a proto ani nezpůsobují zvyšování cen potravin. V některých případech mohou ale zapříčinit nadměrný odběr odpadní biomasy, a tím rychlé vyčerpání půdy. Lze je však také vyrábět z odpadních surovin, jakými jsou například pneumatiky, plasty a použité oleje. Nejedná se tedy pouze o biologicky rozložitelné oleje.

V současné době však nachází uplatnění pouze bioetanol a syntetická motorová nafta. Ostatní produkty jsou zatím spíše ve fázi vývoje výzkumu. Pro biopaliva II. generace jsou charakteristické především chemické přeměny, zatímco při výrobě biopaliv I. generace se uplatňují převážně procesy fyzikálně-chemické povahy a chemické děje probíhají pouze za velmi mírných okrajových podmínek. Na Obrázku 2 lze vidět technologické postupy výroby biopaliv první a druhé generace [10].



Obrázek 2 Technologické postupy výroby biopaliv první a druhé generace [9]

2.2.2.3 Biopaliva III. generace

Tato generace biopaliv se získává z plodin, které nekolidují běžné potravinářské výrobě. Jako nejperspektivnější se zde jeví výroba biopaliv z řas. Ty mají ve srovnání s vyššími rostlinami daleko vyšší efektivitu přeměny sluneční energie a fixaci CO₂. Řasy jsou poměrně nenáročné na prostředí a prostor, navíc oproti běžným plodinám mají také mnohonásobně vyšší výtěžnost na jednotku plochy. Některé druhy řas mohou ve vhodných podmínkách obsahovat až 40 % oleje a výnos na jeden hektar může být až 30x vyšší než při použití nejrentabilnějších energetických rostlin (viz tabulka 1). Jednou z jejich dalších výhod je jejich vysoká růstová rychlost a fakt, že se dají využívat ke zpracování anorganických i organických ve vodě rozpustných odpadů, které jsou jinak nesnadno zpracovatelné. Nevýhodou však zůstává obtížnost zpracování a velká citlivost řasových kultur. Řasy lze pěstovat v otevřených rybnících, uzavřených rybnících nebo bioreaktorech. Z pohledu účinnosti a produktivity se jako nejvhodnější jeví právě bioreaktory. Schéma pěstování řas lze vidět na Obrázku 3 [13; 14].

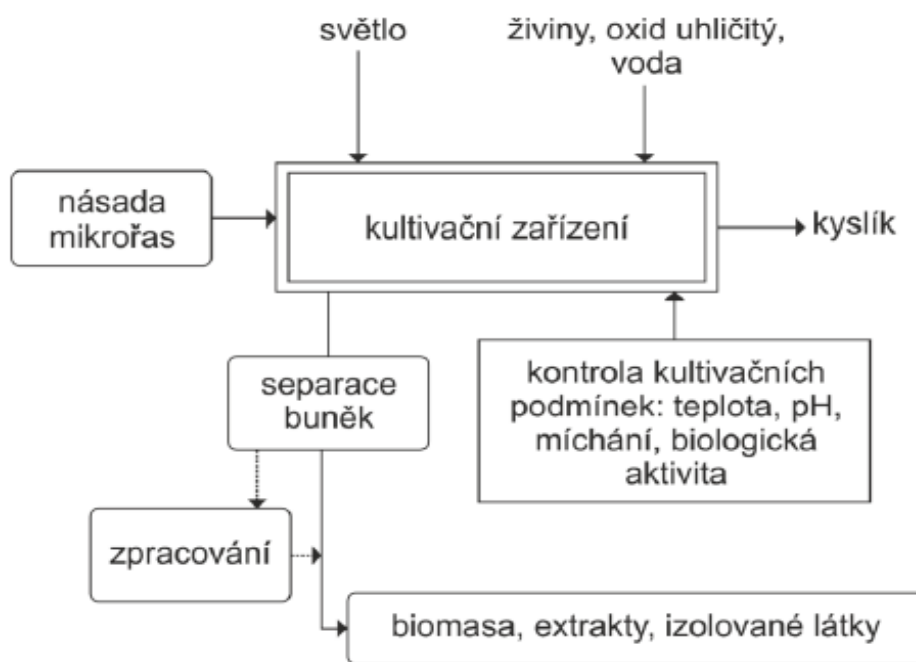
Tabulka 1 Množství oleje získaného z různých druhů rostlin [15]

Druh rostliny	Produkce oleje v litrech na hektar
Sója	380 – 475
Řepka	1 140 – 1 420
Dávivec	1 660 – 2 370
Palma	6 200
Řasy	47 000 – 95 000

Proces výroby biopaliv z řas je založen na jejich fotosyntetické schopnosti, při které jsou za pomoci dalších procesů oxid uhličitý a voda přeměněny na jiné látky, jakými jsou například uhlovodíky či rostlinné oleje. Vědci dokázali řasy geneticky modifikovat tak, že tímto způsobem jsou schopny přeměnit až 40 % oxidu uhličitého, zatímco původně to bylo pouze 15 %. Dalším krokem je zpracování těchto látek na stejné produkty, jako získáváme ze zpracování konvenční ropy.

I přesto, že biopaliva III. generace mají nesporný potenciál, tak stále existuje mnoho problémů, které brání masovému rozvoji řasové biotechnologie v komerčním využití. Celý proces výroby biopaliv řas není v současné době rentabilní. Náklady na výrobu jsou třináásobné v porovnání s náklady na výrobu paliv z konvenční ropy. Při průmyslovém pěstování řas navíc dochází k vysoké spotřebě vodních zdrojů. Dále je potřeba řasy hnojit fosforem a dusíkem, a to v nemalých dávkách. Výroba těchto hnojiv by vyprodukovala značné množství skleníkových

plynů, což by snížilo ekologický přínos těchto paliv. Nicméně výzkum a vývoj v oblasti řasových technologií stále pokračuje. Mezi jejich úkoly patří zejména dosažení vyšší fotosyntetické účinnosti zdokonalováním produkčních systémů, výběr vhodných s vyšším obsahem výchozích látek, propracování pěstebních postupů pro vybrané kmeny mikrořas a snížení výrobních nákladů, tj. spotřeby energií, živin a vody [16].



Obrázek 3 Schéma pěstování řas a zpracování biomasy [16]

2.2.2.4 Biopaliva IV. generace

Biopaliva IV. generace vznikla díky genetické úpravě. Bakterie jsou upraveny tak, aby vyráběly palivo s takovou účinností, že spotřebují více CO₂, než je poté vypuštěno do ovzduší. Přebytky jsou zachyceny a uloženy do země. Tato technologie je ale stále ve vývoji a její využitelnost v praxi je zatím nejasná [17].

2.3 Biopaliva pro zážehové motory

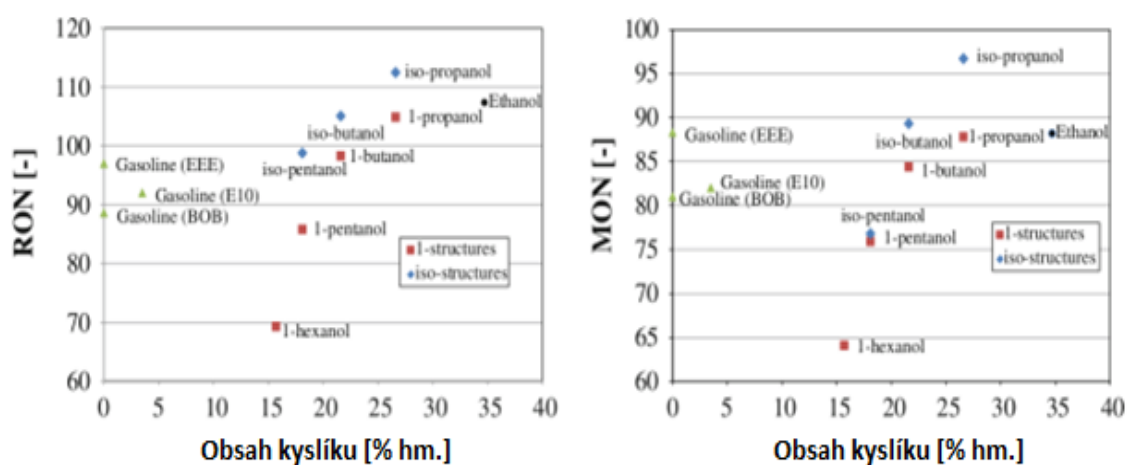
Z důvodu lepší přehlednosti je popis využití biopaliv, v této práci, rozdělen na biopaliva pro zážehové motory a biopaliva pro vznětové motory.

Spalování biopaliv v zážehových motorech může mít pozitivní vliv na emise. Jako náhrada za benzin se zde nejvíce využívají alkoholová paliva, především pak metanol, etanol a butanol. V současnosti je nejpoužívanějším alkoholovým palivem etanol [18].

Tabulka 2 Základní vlastnosti alkoholových paliv a benzínu [18]

Parametr	Metanol	Etanol	Butanol	Benzín
Vzorec	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH	C ₄ H ₉ OH	C _x H _{1,87}
Výhřevnost [MJ·kg ⁻¹]	19,9	28,9	33,1	44,4
Oktanové číslo [-]	110	106–130	94	91–100
Teplota vznícení [°C]	450	420	340	450
Výparné teplo [kJ·kg ⁻¹]	1110	904	710	320
Hustota při 15 °C [kg·m ⁻³]	796	794	814	720–775
Směšovací poměr se vzduchem [1]	6,6	9,0	11–12	12–15
Obsah uhlíku [% hm.]	37,5	52,2	64,8	85,5
Obsah vodíku [% hm.]	12,5	13,0	13,6	14,5
Obsah kyslíku [% hm.]	50,0	34,8	21,6	2,7
Tlak par [kPa]	42	21	2	45–90
Bod vzplanutí [°C]	11	20	34	<20

Ostatní alkoholy se jako paliva pro zážehové motory nevyužívají. Existují pro to hlavně dva důvody. Prvním důvodem je příliš nákladná výroba. Toto omezení je zejména platné pro propanol. Zatím ho nelze vyrobit biochemickou cestou, lze ho pouze syntetizovat z uhlovodíků prekurzorů. Druhým důvodem jsou fyzikální a další vlastnosti alkoholů, které jim neumožňují využití jako palivo. Hlavním problémem je zde především nízké oktanové číslo, které je nižší než u benzínu. Tudiž je nízká i jejich odolnost vůči detonačnímu spalování pro standardní zážehové motory. Srovnání oktanových čísel různých alkoholů lze vidět na Obrázku 4 [19].



Obrázek 4 Oktanová čísla alkoholů [20]

2.3.1 Bioetanol

Termínem bioetanol jako palivo je myšlen etanol vyráběný z biomasy technologií alkoholového kvašení. Etanol (chybně nazývaný líh) je druhý nejnižší alkohol. Jedná se o bezbarvou kapalinu ostré, ve zředění příjemné alkoholické vůně, která je také základní složkou alkoholických nápojů. Je snadno zápalný, a proto je klasifikován jako hořlavina I. třídy. Etanol má nízkou toxicitu a v přiměřených dávkách je relativně neškodný. Lze ho lehce rozpustit ve vodě a přírodní bakterie jej relativně rychle rozkládají na oxid uhličitý a vodu. Z důvodu zabránění záměny s potravinářským alkoholem musí být palivový etanol denaturován přidáním látek se specifickou vůní nebo chutí [21].

2.3.1.1 Výroba bioetanolu

Základem výroby bioetanolu je fermentační proces, tj. působení enzymů (bílkovinných katalyzátorů) mikrobiální buňky některých kvasinek, který je také nazýván kvašení. Tento proces probíhá za absence vzduchu (anaerobně), přičemž provzdušnění kvasného média, zejména ze začátku fermentace, je prospěšné pro nárůst buněk a jejich aktivitu.

Přímo zkvasitelné jsou pouze monosacharidy, jejichž molekula obsahuje 6 uhlíků. Složitější sacharidy je nutné před samotným zkvašením hydrolyzovat na monosacharidy působením vlastních enzymů mikroorganismů nebo pomocí přidání látek, zpravidla kyselin, které hydrolyzu způsobí.

Výrobu etanolu lze dle použité biomasy rozdělit do 3 skupin:

- Výroba bioetanolu z biomasy obsahující jednoduché cukry (cukrová třtina, cukrová řepa),
- výroba bioetanolu z biomasy obsahující škrob (obiloviny),
- výroba bioetanolu z lignocelulosové biomasy (rychle rostoucí dřeviny, odpad biologického původu, sláma, štěpky, papír apod.) [22].

2.3.1.2 Vlastnosti bioetanolu jako paliva

Jak lze vidět v Tabulce 2, bioetanol má v porovnání s benzinem a naftou nízkou výhřevnost. Oproti naftě má nízké cetanové číslo a malé mazací schopnosti. Naopak ve srovnání s benzinem disponuje vysokým oktanovým číslem (OČVM). Po přidání bioetanolu do benzínu dojde ke zvýšení OČVM, ale i tlaku par. Tyto vlastnosti umožňují navýšení kompresního poměru a tím tedy i vyšší účinnost pracovního oběhu, chudší směs a její kratší hoření. Z důvodu jeho nižší výhřevnosti zároveň dojde ke zvýšení měrné spotřeby, v případě

vyššího obsahu bioetanolu v palivové směsi musí být tedy upraven palivový systém, tak aby umožňoval zhruba o 50 % vyšší hmotnostní průtok paliva. Skupenské výparné teplo bioetanolu je oproti benzínu vyšší, to způsobuje výraznější ochlazení palivové směsi přiváděné do motoru a tím i větší naplnění válců palivovou směsí. Vyšší skupenské teplo má však také za následek problémy při spouštění z nízkých teplot. Pro odstranění tohoto problému se používá pomocné zařízení pro spouštění z nízkých teplot, případně je ke spouštění motoru použit benzin [22; 23].

Bioetanol nepříznivě působí na určité plasty a pryže. Způsobuje korozi některých součástí, hlavně palivového příslušenství motoru, tuto jeho nepříznivou vlastnost jde však zmírnit přidáním inhibitorů koroze [22].

2.3.1.3 Použití bioetanolu pro zážehové motory

Bioetanol se v palivech pro zážehové motory může uplatnit jako:

- Náhrada benzínu palivem tvořeným čistým bioetanolem,
- náhrada benzínu palivem s vysokým obsahem bioetanolu (až 90 %, 85 % v palivu E85) pro speciálně upravené motory,
- paliva s rozdílným obsahem bioetanolu (až 85 %) určená pro motory s elektronickými řídicími systémy umožňujícími provoz i na benzin – „Flexible Fuel Vehicles“ (FFV),
- kyslíkatá složka benzínů zvyšující oktanové číslo – ETBE,
- bioetanol přidávaný do benzínu v maximálním množství zhruba 20 % jako kyslíkatá složka, která současně zvyšuje oktanové číslo [24].

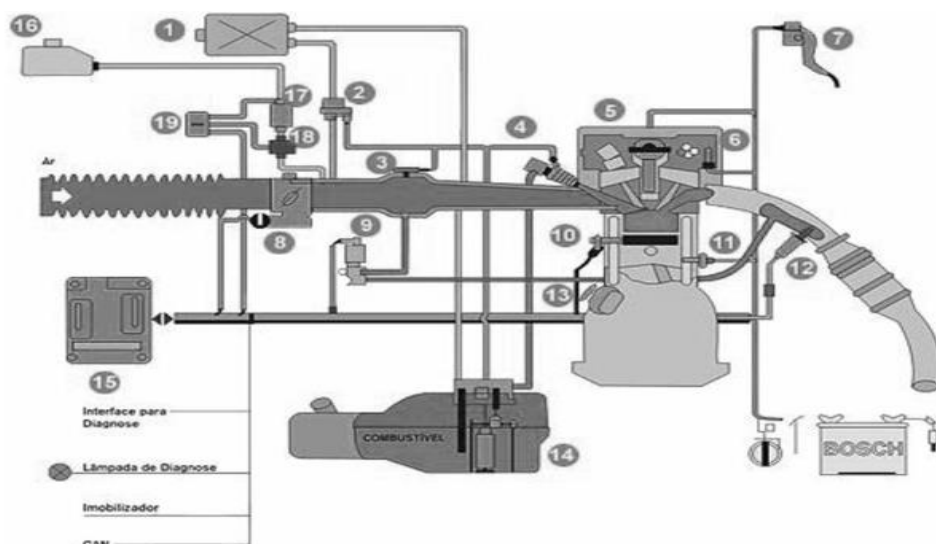
Směs označovaná E85 je tvořena až z 85 % etanolem a z 15 % benzinem (85 % je horní hranice, v této definici je zahrnuta i možnost mísení různých sezónních poměrů s obsahem etanolu vyšším než 50 %). Toto palivo je nejvíce rozšířené v Brazílii a USA, kde lze také nalézt palivové směsi E10, E22 a E100. Obsahuje téměř 30 % kyslíku, má OČVM 110 a používá se pro motory speciálně upravené pro provoz na etanolové palivo. Při přechodu na toto palivo z benzínu zůstává obsah CO ve výfukových plynech přibližně stejný nebo mírně poklesne, obsah HC vzroste, přičemž násobně vzroste podíl aldehydů a lehce klesne množství NO_x [24; 25].

Možnost prakticky libovolně kombinovat podíl etanolu a benzínu (až do 85 % etanolu) umožňují tzv. FFV motory. Kromě toho umožňují i provoz na čistý benzin. Motor může mít vysoký kompresní poměr a jeho palivový systém je předimenzován pro provoz na etanolové palivo a je přizpůsoben proti agresivnímu působení etanolu na některé jeho části. Řídicí jednotka získává informace o obsahu etanolu v palivu podle koncentrace kyslíku ve výfukových

plynech a tomu přizpůsobuje seřizovací parametry, jakými jsou například dávkování paliva, předstih zážehu aj. Schematické znázornění FFV motoru a jeho popis lze vidět na Obrázku 5 [24; 25].

U běžných zážehových motorů na benzin může přidání etanolu přinést problémy spojené s citlivostí etanolu na vodu a relativně vysokým tlakem nasycených par etanolu. Přítomnost již malého množství vody v etanolu může totiž vést k rozpadu směsi benzínu s bioetanolem na dvě fáze, přičemž bioetanol přechází do fáze vodní. Nutný je přídavek kosolventů. Řada zkoušek ukázala, že při podílu etanolu v benzinu do 20 % nemusí být motor výrazněji přizpůsoben. Postačí seřízení nebo předimenzování palivového systému z důvodu nižší výhřevnosti palivové směsi [25].

Bioetanol lze také využít jako vstupní surovinu pro výrobu bio etyltertbutyléteru (ETBE). Biosložka v tomto případě tvoří 47 % podíl. ETBE slouží jako náhrada za antidetonační činidlo metyl-terc-butyléter (MTBE) [26].



1- zachycovač palivových par, 2 - ventil zachycovače palivových par, 3 - snímač tlaku, 4 - vstříkovače, 5 - zapalovací cívka, 6 - snímač polohy vačkového hřídele, 7 - pedál akcelerace, 8 – škrticí klapka, 9 – ventil recirkulace výfuk. plynů, 10 - snímač klapání, 11 - snímač teploty, 12 – lambda sonda, 13 - snímač otáček, 14 - palivová nádrž s čerpadlem, 15 – řídicí jednotka motoru, 16 - nádrž na benzin, 17, 18, 19 - benzinový palivový systém pro spouštění motoru

Obrázek 5 Schéma FFV motoru [24]

2.3.2 Biobutanol

Obdobně jako u bioetanolu, je biobutanolem myšlen butanol vyráběný z biomasy pomocí technologie fermentace přímo z kvasitelných jednoduchých cukrů. Butanol je čirá tekutina ostrého zápachu. Obsahuje čtyři uhlíky a je čtvrtý v řadě základních alkoholů. Používá se jako ředidlo a rozpouštědlo, v analytické chemii, pro laboratorní syntézy a k farmaceutické

výrobě a analýze. Je mnohem méně těkavý než etanol nebo benzin. Jeho korozivní vlastnosti jsou mnohem menší než u etanolu a také méně pohlcuje vodu [27].

2.3.2.1 Výroba biobutanolu

Pro výrobu biobutanolu se jako základní suroviny, stejně jako při výrobě bioetanolu, používají škrobnaté a cukerné suroviny. Obdobně jako bioetanol ho lze vyrobit pomocí fermentace zkvasitelných jednoduchých cukrů, tzv. ABE (Aceton-Butanol-Ethanol) procesem, za působení mikroorganismu *Clostridium acetobutylicum* [28].

Při využívání cukerných a škrobnatých surovin pro výrobu biobutanolu tvořila surovina zhruba 60 % nákladů. Z tohoto důvodu se dnes hledají levné suroviny, jakými jsou lignocelulózové materiály a odpadní produkty průmyslových výrob bohaté na sacharidy. Volba surovin používaných k výrobě však také závisí na enzymovém vybavení mikroorganismů. Klostridie produkující rozpouštědla jsou totiž oproti kvasinkám schopny fermentovat širší spektrum sacharidů. Kultury *Clostridium acetobutylicum* a *Clostridium beijerinckii* mohou jako substrát využít monosacharidy, disacharidy a na rozdíl od kvasinek dokonce i polysacharidy (škrob). Butanol je hlavním fermentačním produktem také u bakterií *Butyrubacterium methylotrophicum* a *Hyperthermus butylicus*. Tyto výše zmíněné kultury bakterií však nemají enzymové vybavení pro fermentaci polysacharidů typu celulózy a hemicelulózy, proto musí být takové suroviny nejdříve podrobeny hydrolyze na jednoduché cukry působením enzymů nebo ředěných kyselin.

Suroviny pro ABE fermentaci se dají rozlišit na:

- cukernaté (syrovátka, řepná melasa),
- škrobnaté (obilí, rýže, brambory, kukuřice),
- lignocelulózové (dřevo, sláma) [28].

2.3.2.2 Vlastnosti biobutanolu jako paliva

Biobutanol je svými vlastnostmi podobnější benzinu než bioetanolu. V porovnání s benzinem má nižší výhřevnost, několikanásobně vyšší viskozitu, nízký tlak par a vyšší výparné teplo (viz Tabulka 2). Jeho oktanové číslo je srovnatelné s oktanovým číslem benzinu. Cetanové číslo je výrazně nižší než cetanové číslo nafty. Zamrzá až při teplotě -89 °C. Z hlediska manipulace je díky nižšímu tlaku par bezpečnější než běžné benziny a je dobře biologicky odbouratelný, tudíž nepředstavuje ohrožení půdy ani vody. Vzhledem k jeho vyšší viskozitě, zejména při nízkých teplotách u směsí s vysokým podílem biobutanolu, dochází

k většímu namáhání palivového čerpadla, z tohoto důvodu je pro motory bez úprav palivového systému vhodný zejména v teplejších oblastech [28; 29].

Pokud je porovnán biobutanol s bioetanol, tak je jeho výhřevnost značně vyšší, má vyšší bod varu, nižší výparné teplo a nižší oktanové číslo. Na rozdíl od bioetanolu prakticky nepohlcuje vodu, díky čemuž nevzniká tedy separovaná fáze vody s butanolem. Přestože je méně korozivní než bioetanol, stále může způsobit korozi některých součástí motoru, zejména palivového příslušenství, tuto vlastnost lze však zmírnit inhibitory koroze. Vlivem jeho hygroskopických vlastností je ho možné přepravovat již existujícími produktovody, cisternami a distribuovat jen částečně upravenými čerpacími stanicemi. Chování biobutanolu vůči většině konstrukčních materiálů včetně plastů je oproti bioetanolu méně agresivní. Určitou nevýhodou je menší oktanové číslo, a tudíž i větší náchylnost ke klepání a nižší účinnost, to by mohlo vyvolat požadavek na určité konfigurace rafinérských výroby na úpravu složení benzinového poolu, především na omezení přídavku olefinů a větší tlak na mísení isoalkanických frakcí s nízkou citlivostí paliva [28; 30].

2.3.2.3 Použití biobutanolu pro zážehové motory

Benzinové motory jsou schopné spalovat směsi benzínu s biobutanolem v jakémkoliv poměru obou složek. Použití takové směsi má však z důvodu nižší výhřevnosti biobutanolu za následek zvýšení spotřeby oproti použití samotného benzínu. Pokud by směs měla vyhovovat podmínkám normy ČSN EN 228+A1 „Motorová paliva – Bezolovnaté automobilové benziny – Technické požadavky metody zkoušení“, která specifikuje dva druhy bezolovnatého benzínu: jeden druh s maximálním obsahem kyslíku 3,7 % (m/m) a maximálním obsahem etanolu 10 % (V/V) a druh určený pro starší vozidla, která nejsou garantována k použití bezolovnatého benzínu s vysokým obsahem biopaliv s maximálním obsahem kyslíku 2,7 % (m/m) a maximálním obsahem etanolu 5,0 % (V/V), obsah biobutanolu v ní by nesměl překročit 11,7 % (uvažováno pro druh určený pro starší vozidla). Biobutanol může být v zážehových motorech spalován také samostatně (100 % biobutanol). V takovém případě, stejně jako u směsi s vysokým podílem biobutanolu a nízkým podílem benzínu, je třeba provést technické změny palivového systému vozidla. Tyto změny jsou však méně rozsáhlé než v případě použití bioetanolu. V chladném počasí u těchto směsí také dochází k zhoršení startovatelnosti z důvodu nízkého tlaku par a nedostatečného odpařování [25; 28].

Z pohledu množství vzniklých emisí má biobutanol výhodu, že při jeho spalování nedochází k produkci SO_x , NO_x a CO a produkované CO_2 a H_2O se vrací do ovzduší, ze kterého byly zpracovány rostlinami přijaty. Výsledky měření zkoušek však ukazují, že při přimíchání

11,7 % biobutanolu do benzinu nedochází k výraznějšímu ovlivnění výsledků emisních testů [25].

2.3.3 Biometanol

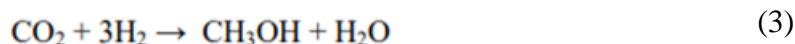
Metanol lze vyrobit několika způsoby. Jednou možností je získání metanolu z některých fosilních paliv. Další možnost je získání metanolu produkcí z biomasy, v takovém případě se nazývá biometanol. Metanol je nejjednodušší alkohol. Jedná se o bezbarvou, silně jedovatou, těkavou, hořlavou kapalinu charakteristického alkoholového zápachu, kterou lze neomezeně mísit s vodou. Z důvodu jeho toxických vlastností je při jeho manipulaci třeba dbát značné opatrnosti (může se dostat do krevního oběhu i kontaktem s kůží). Metanol je zařazen do I. třídy nebezpečnosti a se vzduchem vytváří výbušnou směs. Vyznačuje se velkou univerzálností a používá se jako rozpouštědlo, nemrznoucí činidlo a oktanový posilovač [31].

2.3.3.1 Výroba biometanolu

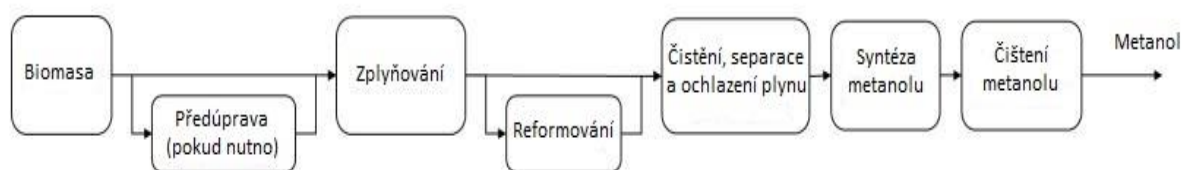
Pro výrobu biometanolu existuje několik výrobních technologií. Mezi tyto technologie patří například pyrolýza, biosyntéza, elektrolýza nebo fotoelektrochemické procesy [32].

Hlavním způsobem výroby je však zplyňování. Při získávání biometanolu tímto způsobem je nejdříve potřeba vyrobit syntézní plyn, tzv. synplyn. Ten se vyrábí zplyňováním biomasy. Zplyňování lze popsat jako proces, při kterém reaguje kyslík (v menším než stechiometrickém množství) s biomasou za vysokých teplot. Hlavními složkami výsledného syntézního plynu jsou CO a H_2 , dále jsou v něm obsaženy CO_2 , CH_4 , H_2O , N_2 a také některé nečistoty, které je třeba odstranit v závislosti na tom, k čemu bude získaný syntézní plyn použit [33; 34].

Vznik biometanolu ze syntézního plynu popisují chemické rovnice 2 a 3:



Tyto reakce probíhají při tlaku 5–10 MPa a při teplotě 200–300 °C a je při nich nutné použít katalyzátor, jakým může být například Zn, Al_2O_3 nebo Cu [34].



Obrázek 6 Zjednodušené schéma produkce biometanolu [34]

2.3.3.2 Vlastnosti biometanolu jako paliva

Vozidla používající jako palivo biometanol se svým projevem podobají vozidlům spalujícím benzin. Biometanol je alkoholové palivo s nejvyšším oktanovým číslem, tato vlastnost umožňuje vyšší kompresní poměr motoru a tím zvyšuje jeho celkovou účinnost. Ve srovnání s benzinem má výrazně nižší emise škodlivin, v průměru o 20–70 %. Jeho cetanové číslo je oproti cetanovému číslu motorové nafty velmi nízké. Má relativně nízkou teplotu hoření a vysokou energetickou hustotu. V porovnání měrných výhřevností biometanolu a benzinu lze však zjistit, že vyšší energetická hustota biometanolu není schopna kompenzovat jeho nižší energetický obsah. Ve výsledku jsou výhřevnosti vztažené na jeden litr biometanolu a benzinu v poměru 1:2. To znamená zhruba dvojnásobnou spotřebu biometanolu oproti benzinu a potřebu úpravy palivového systému vozidla, tak aby byla zvýšena dodávka paliva do motoru. Spalování biometanolu vyžaduje méně vzduchu díky jeho vyššímu obsahu kyslíku. To však zároveň znamená, že pokud má směs benzinu s biometanolem splňovat normu ČSN EN 228+A1, nesmí obsah biometanolu překročit hranici 3 % (uvažováno pro druh benzinu určený pro starší vozidla) [35; 36].

Co se týče bezpečnosti, tak biometanol představuje menší riziko než benzin. Je méně prchavý, tudíž představuje menší nebezpečí při dopravních nehodách. Jak již bylo zmíněno, biometanol je rozpustný ve vodě, případný požár je tedy možné hasit vodou a díky nízké teplotě plamene je požár možné zlikvidovat na malou vzdálenost [37].

Biometanol, stejně jako bioetanol, vytváří sloučeniny, které zvyšují tlak par palivové směsi. Tyto těkavé frakce je proto třeba z benzinu odstraňovat. Další jeho nevýhodou je toxicita pro organismy, to představuje problém zejména při čerpání paliva, kdy může dojít k vdechnutí nebo styku s kůží. Také podobně jako bioetanol způsobuje korozi kovových materiálů, má detergentní účinky (odstraňuje olej z míst, kde je potřebný) a negativní vliv na plastické hmoty. Má vyšší zápalnou teplotu jak benzin, což za nízkých teplot může mít nepříznivý vliv na startovatelnost. Za určitých podmínek také může způsobit potíže to, že biometanol hoří neviditelným plamenem [36; 37].

2.3.3.3 Použití biometanolu pro zážehové motory

Biometanol lze v zážehových motorech využít jako:

- Náhradu benzínu palivem tvořeným pouze biometanolem,
- směsnou složku paliva o různém obsahu pro neupravené zážehové motory,
- směsnou složku paliva o různém obsahu pro FFV motory,
- čisté palivo u vozidel využívajících dva druhy paliva,
- příměs do benzínu pro zvýšení oktanového čísla a nižší emise v podobě MTBE (Metyl-Terc-ButylEter) [38].

Biometanol lze využívat jako čisté palivo nebo ve směsi s benzinem. V současné době jsou všechna auta se zážehovým motorem na trhu schopna spalovat směsi s nízkým obsahem biometanolu (v případě splnění normy ČSN EN 228+A1 jsou to 3 % biometanolu ve směsi). Starší vozidla (zpravidla vozidla vyrobená před rokem 2002) mohou mít problémy i s těmito nízkoprocentními směsmi [39].

U směsí s vyšší koncentrací biometanolu v palivu (obsah biometanolu až 85 % u paliva M85) může docházet, z důvodu jeho korozních vlastností a agresivních účinků na některé elastomery, k problémům s kompatibilitou materiálů, a to zejména v palivovém systému. To společně se zvýšenou spotřebou a nižší výhřevností biometanolu vede k nutnosti úpravy palivového a vstřikovacího systému, tak aby těmto negativním vlivům odolal a byl schopen dopravit do motoru větší množství paliva. Dalším problémem u paliv s vyšší koncentrací biometanolu, stejně jako u ostatních alkoholových paliv, jsou studené starty. Tento problém může být vyřešen dalšími úpravami motoru nebo přidáním aditiv do paliva. Větší odolnost vůči klepání umožňuje zvýšení maximálního tlaku ve válci, tento fakt v kombinaci s omezenými mazacími schopnostmi a ochlazováním způsobeným vypařováním biometanolu (zejména v oblasti sedel ventilů) vede také ke zvýšeným konstrukčním požadavkům na blok a hlavu motoru. U směsí s vyšším obsahem biometanolu, obdobně jako u směsí s vysokou koncentrací jiných alkoholů, může docházet z důvodu nízké energie potřebné zapálení k samozápalům. Typickým řešením tohoto problému je použití zapalovací svíčky s nižší teplotou jiskry. Směsi s vysokou koncentrací biometanolu mohou být také spalovány v FFV motorech podobně jako u bioetanolu, viz kapitola 2.3.1.3. [39].

Jak již bylo zmíněné výše, biometanol může být použit jako čisté palivo, a to buď v motorech konstruovaných přímo pro tento typ paliva nebo v motorech využívajících více druhů paliva. Tyto motory využívají OOD („octane on demand“) systém, kdy motor běží na relativně nízkooktanové palivo, nejčastěji benzin, a biometanol je využit pouze v případech,

kdy hrozí riziko klepání motoru. Díky tomu může mít motor vyšší kompresní poměr nebo menší objem a tím i menší spotřebu paliva [39].

Další využití v zážehových motorech biometanol nalézá v podobě MTBE (Metyl-Terc-ButylEter). Ten se vyrábí podobným způsobem, jako se z etanolu vyrábí ETBE, tj. reakcí isobutenu C_4H_8 a reakcí příslušného alkoholu, v tomto případě metanolu. MTBE má kromě podobného způsobu i podobné vlastnosti jako ETBE. Oproti původnímu biometanolu má vyšší výhřevnost, nižší tlak par a lepší mísitelnost s benzinem. Používá se jako příměs do benzínu za účelem zvýšení oktanového čísla a snížení emisí [33].

2.4 Biopaliva pro vznětové motory

Biopaliva se ve vznětových motorech, stejně jako v motorech zážehových, používají jako čisté palivo nebo aditivní složka motorové nafty. Motorovou naftu je možné aditivovat dvěma základními druhy biopaliv, těmi jsou biopaliva založená na bázi olejů a biopaliva na bázi alkoholu.

2.4.1 Alkoholy jako palivo ve vznětových motorech

Použití alkoholových biopaliv ve vznětových motorech je kvůli jejich odlišným vlastnostem oproti motorové naftě daleko komplikovanější než u motorů zážehových. To je hlavní příčinou, proč zde není jejich využití tak rozšířené jako v motorech zážehových. Důvodem použití biopaliv založených na alkoholu je zejména snížení emisí, zlepšení účinnosti spalování a tím i dosažení nižší spotřeby paliva. Jako nejvíce vhodné a zároveň nejjednodušší se jeví jejich přímé přidávání do motorové nafty v limitovaném množství jako aditivní přísady.

2.4.1.1 Použití bioetanolu pro vznětové motory

Hlavní problém při použití bioetanolu ve vznětových motorech je jeho nízká vznětlivost, která je dána nízkým cetanovým číslem a musí být zvyšována speciálními aditivami. I přes tuto aditivaci není možné bioetanol v běžných vznětových motorech používat a je nutné provést jejich úpravu. Základní úpravou je navýšení kompresního poměru na 25 a více a vzhledem k nízké výhřevnosti bioetanolu také předimenzování vstřikovacího systému. V takto upraveném motoru pak již není možné spalovat běžnou motorovou naftu. Tímto způsobem využití se například zabývá firma Scania, která v těchto motorech spaluje palivo ED95 [22; 40].

Další možností využití je u vozidel pracujících se dvěma palivy zároveň, část energetického obsahu je tedy přiváděna v podobě bioetanolu a část v podobě motorové nafty.

Jedním z technických řešení je například použití dvou vstřikovacích čerpadel, přičemž jedno čerpadlo vstřikuje motorovou naftu a druhé bioetanol. Tímto způsobem lze nahradit až 85 % motorové nafty bioetanolem. Další variantou je nasávání bioetanolu se vzduchem. Příprava směsi se zde uskutečňuje buď v karburátoru, nebo nízkotlakým vstřikováním před sací ventil. K vlastnímu zapálení směsi zde dojde vstříknutím zapalovací dávky motorové nafty. Takto lze nahradit zhruba 35 % motorové nafty bioetanolem [22; 25].

Nejjednodušším využitím bioetanolu ve vznětových motorech je jeho přímé přidání do motorové nafty. Tento způsob využití však naráží na obtížnou mísitelnost obou paliv a nízkou stálost směsi. Hrozí zde separace jednotlivých fází směsi. Stabilita je nejvíce ovlivněna teplotou a podílem vody v bioetanolu. Stabilitu jednotlivých fází lze podpořit přidáním kosolventů. Zdá se, že z pohledu přímo škodlivých emisí přináší největší relativní efekt přidání 5 % bioetanolu, a to zejména z pohledu produkce CO, HC, NO_x a PM. Přidání vyššího procenta bioetanolu již výrazné změny ve snížení těchto emisí nepřináší. Z hlediska snížení CO₂ je lepší přidávat větší podíl bioetanolu. Zároveň je nutné počítat s tím, že bioetanol v palivu snižuje jeho mazací schopnosti a tím zvyšuje opotřebení některých částí vstřikovacího systému [22; 41].

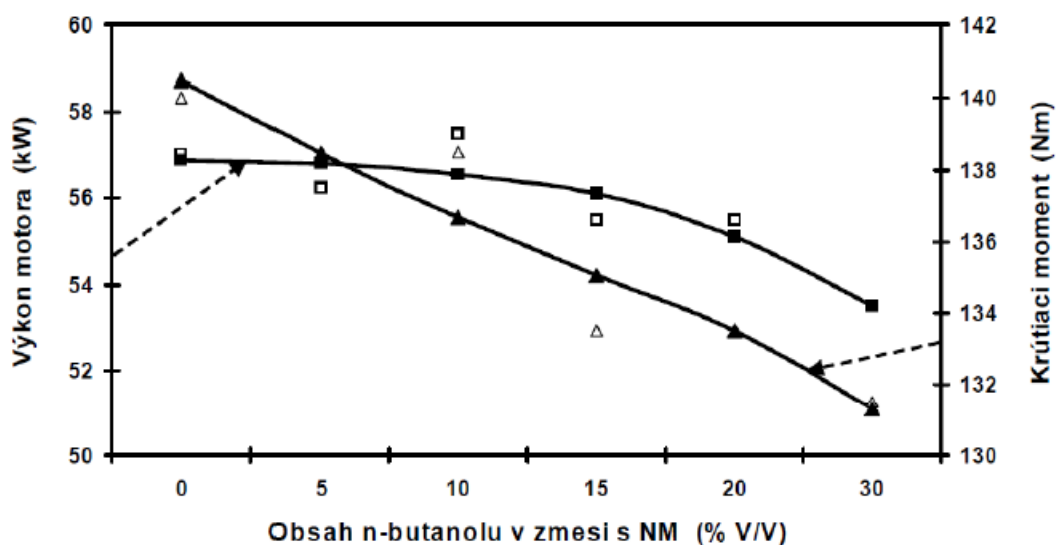
2.4.1.2 Použití biobutanolu ve vznětových motorech

Biobutanol je svými vlastnostmi více podobný motorové naftě než bioetanol a biometanol. Má několikanásobně vyšší cetanové číslo, avšak stále musí být zvyšováno speciálními aditivami. Dále je nutné podobně, jako u ostatních alkoholových paliv, počítat se zvýšením spotřeby v důsledky nižší výhřevnosti, horšími mazacími schopnostmi nebo s agresivním chováním vůči některým součástkám. Oproti bioetanolu ale umožňuje použití vyššího procentuálního podílu ve směsném palivu s motorovou naftou a směsi jsou stabilní i při nízkých teplotách [42; 43].

Stejně jako u bioetanolu lze biobutanol spalovat v speciálně upravených motorech nebo ve vozidlech s dvoupalivovým systémem s oddělenou nádrží. Nejvhodnější se však jeví možnost použití biobutanolu jako složky přimíchávané do motorové nafty. Díky jeho vlastnostem je jím možné nahrazovat motorovou naftu až do koncentrace cca 40 % bez nutnosti úprav vznětového motoru. Tyto směsi jsou podobné svými vlastnostmi motorové naftě, odlišnost však nastává v mazivosti. Při koncentracích biobutanolu nad 20 % mazivost směsi totiž výrazně klesá [25; 44].

Podle literatury ovlivňuje přidání biobutanolu do motorové nafty produkci škodlivých výfukových emisí. Nahrazení 30 % motorové nafty biobutanolem přináší ve srovnání s čistou motorovou naftou mírné snížení obsahu CO a NO_x, snížení obsahu PM až o 50 % a zvýšení

obsahu uhlovodíků o 40–70 %. Ohledně vlivu množství biobutanolu ve směsi s motorovou naftou na výkon motoru a točivý moment motoru provedl VÝRUP (Výzkumný ústav pro ropu a uhlovodíkové plyny) motorové zkoušky na automobilu Škoda Octavia 1.9 SDi. Byly použity směsi s obsahem biobutanolu 5 %, 10 %, 15 %, 20 % a 30 %. Cetanové číslo bylo pomocí přísady di-ethylhexylnitrátu zvýšeno na 55. Ani u jedné směsi nedošlo k rozfázování směsi či vytvoření zákalu. Motorové zkoušky ukázaly, že do 15 % obsahu biobutanolu ve směsi klesá výkon motoru pouze mírně, při větším obsahu je pokles razantnější. Snižování točivého momentu je proporcionalní koncentraci biobutanolu ve směsi paliva, viz Obrázek 7 [42; 45].



Obrázek 7 Vliv koncentrace butanolu v palivové směsi na výkon a točivý moment motoru [45]

2.4.1.3 Použití biometanolu ve vznětových motorech

Stejně jako ostatní alkoholy, tak ani biometanol nelze spalovat ve vznětových motorech v čisté podobě. Motor musí být konstrukčně upraven nebo musí být využit systém pracující se dvěma druhy paliv zároveň. Je to způsobeno vlastnostmi biometanolu, zejména jeho nízkým cetanovým číslem a nízkou vznětlivostí [46].

Naopak použití biometanolu ve směsi s motorovou naftou až do koncentrace 20 % biometanolu nevyžaduje větší modifikaci motoru. Problémem u toho způsobu použití však je fakt, že biometanol a motorová nafta nejsou vzájemně 100 % mísitelná paliva, i malé množství vody může způsobit separaci jednotlivých fází směsi. Kombinace problému s mísitelností, separací fází a nízkého cetanového čísla má za důsledek, že i při malém objemovém množství biometanolu ve směsi je vliv příměsi na spalování relativně velký [43; 46].

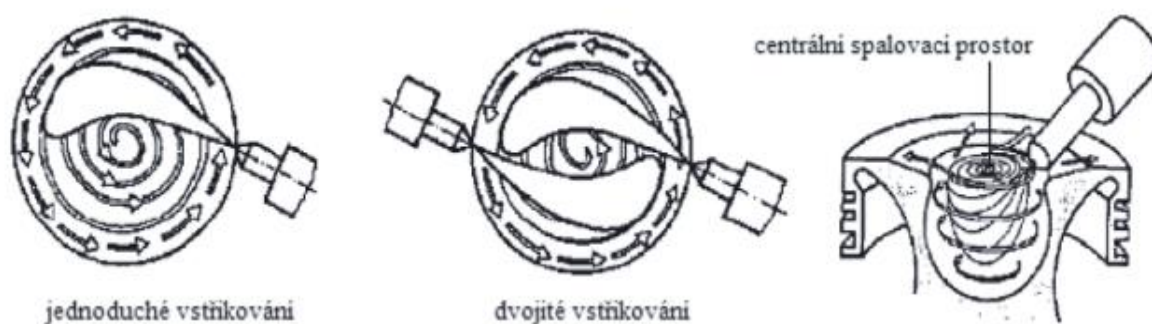
Podle studií a provedených zkoušek zvyšující se množství biometanolu ve směsi s motorovou naftou snižuje účinnost, kouřivost, množství CO a uhlovodíků, naopak se zvyšuje množství NO_x a měrná spotřeba paliva. Yusaf a Najafi také zkoumali důsledky použití směsi

metanolu a motorové nafty na chování motoru. Použili směsi o objemové koncentraci metanolu 10 %, 20 % a 30 %. Zjistili, že výsledné křivky výkonu i točivého momentu byly vyšší než v případě použití čisté motorové nafty. Měrná spotřeba se výrazně neměnila a palivová směs o koncentraci 30 % měla nejnižší měrnou spotřebu. Obecně lze však říci, že přidání metanolu do 20–30 % nemá zásadní vliv na změnu průběhu výkonu a točivého momentu. Měrná spotřeba je ovlivněna o něco více a s přibývajícím obsahem metanolu v palivové směsi roste [46; 47].

2.4.2 Využití rostlinných olejů a produktů z nich vyrobených ve vznětových motorech

Rostlinné oleje lze ve vznětových motorech využít v čisté formě nebo jako složku do motorové nafty. Spalování rostlinných olejů v jejich čisté podobě však přináší řadu problémů. Vyšší viskozita má za následek horší rozprášení paliva, což je příčina obtížnější regulace motoru. Komplikace spojené se zvýšenou viskozitou rostlinných olejů je možné řešit zahříváním olejů a úpravou vstřikovacích trysek. Dalšími problémy jsou tvorba poměrně velkých kapek oleje nebo nízká odpařitelnost, tyto vlastnosti vedou ke tvorbě karbonu, znehybnění pístních kroužků a případnému zadření motoru. Z výše uvedeného vyplývá, že rostlinné oleje nelze spalovat v jejich čisté podobě v běžných vznětových motorech, musí zde nejdříve dojít ke konstrukční úpravě motoru nebo k úpravě samotného paliva [10; 48].

V současné době již existují přestavby motorů na spalování rostlinného oleje. Nejčastěji se jedná o motory používající dvoupalivové systémy, kde je pro rozběh a doběh využívána klasická motorová nafta. Rostlinné oleje získávané studeným lisováním lze v čisté podobě nebo v libovolném poměru s motorovou naftou spalovat v Elsbettově duotermickém motoru. Hlavní odlišností tohoto motoru od konvenčního vznětového motoru je použití speciálních pístů, způsobu vstřikování paliva a systému chlazení motoru. Smyslem je zabránit úniku užitečné energie ve formě tepla mimo spalovací prostor. Z tohoto důvodu je teplo soustředěno uvnitř kulového spalovacího prostoru, jenž je umístěn v pístu a nepřichází tedy do styku s povrchy, které by ho odváděly. Princip duotermického motoru je možné vidět na Obrázku 8 [10; 49].



Obrázek 8 Princip duotermického motoru [49]

Měření s cílem posoudit změnu spotřeby a produkce škodlivých emisí při provozu na rostlinný olej, respektive řepkový olej a motorovou naftu bylo realizováno na České zemědělské univerzitě v Praze na motoru Zetor 7701. U některých parametrů motoru došlo ke zlepšení, většina sledovaných parametrů motoru se však při použití řepkového oleje změnila k horšímu. Výkon poklesl o 5 %, měrná spotřeba vzrostla o 16,3 %, produkce měrných emisí CO₂ vzrostla o 8,9 %, produkce měrných emisí HC vzrostla o 19,7 % a emise NO_x vzrostly o 24 %. Naopak produkce měrných emisí CO klesla o 22,9 % a kouřivost klesla o 20 % [49].

Vedle konstrukční úpravy motoru lze výše zmíněné problémy spojené se spalováním rostlinných olejů řešit také úpravou samotných rostlinných olejů.

Existuje několik možností odstranění těchto problémů:

- Pyrolýza,
- mikroemulzifikace,
- ředění,
- transesterifikace [50].

První a nejjednodušší z procesů zpracování rostlinných olejů je pyrolýza. Při tomto procesu je jedna látka přeměněna na jinou působením tepla a katalyzátoru [4].

Mikroemulzifikace je proces, při kterém dochází k vytvoření mikroemulzí. Rozměry částic v mikroemulzi jsou většinou 1–150 nm. Vznik mikroemulzí má za důsledek zlepšení vlastností paliva. Tato paliva se nazývají „hybridní paliva“ [4].

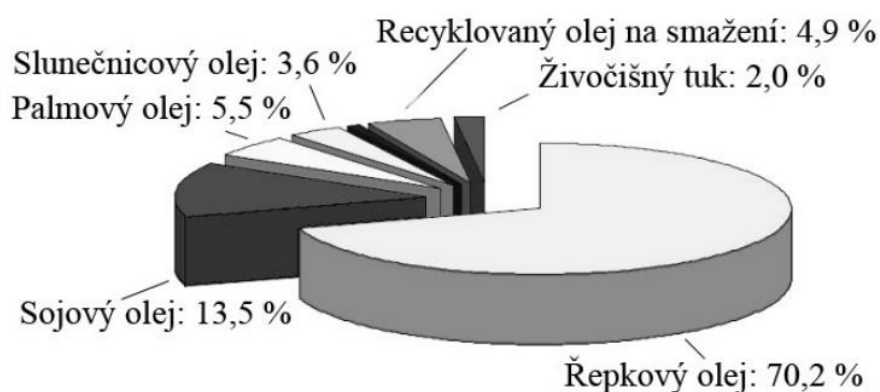
Při procesu ředění rostlinných olejů jsou jejich negativní vlivy na spalování zeslabeny snížením jejich koncentrace v palivové směsi, respektive rostlinný olej je naředěn palivem jiným.

Transesterifikace je reakce triglyceridu (oleje) s alkoholem za přítomnosti katalyzátoru (při použití superkritického alkoholu není katalyzátor potřeba). Nejběžnějším produktem transesterifikace je FAME (fatty acid methyl ester). Vzhledem k faktu, že motorovou naftu lze FAME aditivovat až do její 100 % náhrady, je FAME dobrým kandidátem jako její alternativa [4; 50].

2.4.3 Metylestery mastných kyselin

Jak již bylo zmíněno, FAME (fatty acid methyl ester) lze s motorovou naftou mísit v jakémkoliv poměru a jedná se o palivo na bázi metylesterů vyšších mastných kyselin vyrobené z biomasy. V případě, kdy je podíl FAME v palivu 100 %, tak se jedná o tzv. „bionaftu“ [51].

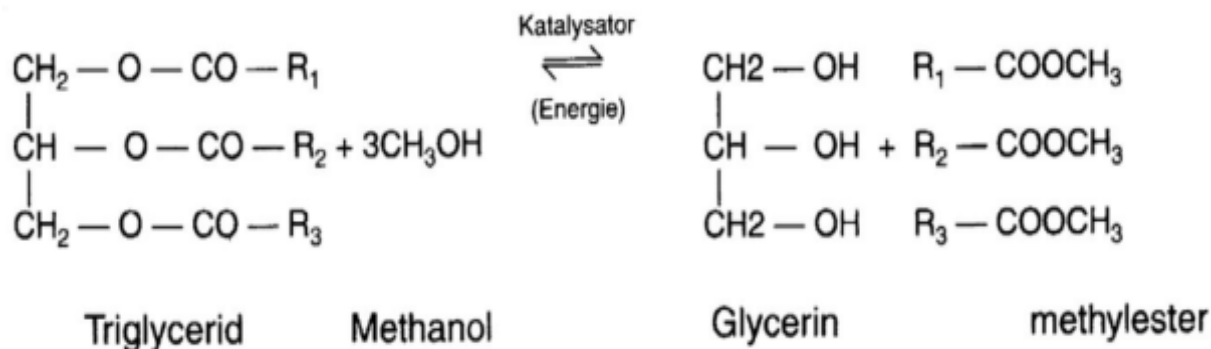
Bionaftu lze vyrobit z více druhů surovin, avšak více než 80 % světové produkce je vyrobeno z řepkového, slunečnicového, palmového a sójového oleje. Kromě rostlinných olejů lze k výrobě bionafty také použít živočišné tuky a loje. Při využití živočišných tuků, které jsou v současné době odpadním produktem, lze potlačit nevýhody použití FAME, jako jsou například horší oxidační stabilita a skladovatelnost, jejich podíl na celkové výrobě ale činí pouze okolo 2 %. U výroby metylesterů tvoří cena olejů a tuků více než 80 % celkových výrobních nákladů, z tohoto důvodu se výrobci snaží využívat i levnější surovinové zdroje, jakými jsou například nejdle či odpadní oleje a tuky. Podle zdroje použitého k výrobě nesou metylestery název a označení. Konkrétně v České republice, stejně jako ve většině Evropy, je nejrozšířenější náhradou motorové nafty metylester řepkového oleje – MEŘO vyráběný z řepkového oleje. Hlavním důvodem, proč je v České republice pro výrobu bionafty, respektive MEŘO využíván převážně řepkový olej, jsou příznivé klimatické podmínky pro pěstování řepky olejky (latinsky *brassica napus*) a vysoký obsah oleje v jejich semenech (40-50 % hm.). Řepka olejná se zde pěstuje na cca 400 tis. ha orné půdy, což představuje 13,5 % podíl. To znamená, že je dokonce překračován limit daný osmihonným osevním postupem (ten pro každou plodinu rezervuje osminu půdy, tedy 12,5 %). Celkově se v České republice vypěstuje více než 1 milion tun řepkového semene, z čehož je na výrobu bionafty spotřebováno 420 tis. tun. Tendence Evropské unie však směřují k omezování výroby prvogenerační bionafty z důvodu negativních vlivů masivního pěstování řepky olejné na krajinu a také z důvodu snahy o náhradu části prvogenerační bionafty bionaftou druhé generace, která je vyráběna z nepotravinářských surovin, jakými jsou například odpadní rostlinné a živočišné tuky. Dnes již dokonce řada zemí zavádí povinný podíl druhogenerační bionafty, takovou zemí je například Nizozemsko. Strukturu zastoupení olejů a tuků pro výrobu bionafty v Evropě lze vidět na Obrázku 9 [52; 53].



Obrázek 9 Struktura zastoupení olejů a tuků pro výrobu bionafty v Evropě [52]

2.4.3.1 Výroba FAME

Výroba metylesterů mastných kyselin patří již k zavedeným technologiím. Podstatou výroby je transesterifikace triglyceridů realizovaná za přítomnosti vhodného katalyzátoru. Reagujícími látkami jsou živočišné tuky a loje nebo rostlinné oleje a metanol. Základní schéma transesterifikace je zobrazeno na Obrázku 10. R₁, R₂ a R₃ zde představují dlouhé uhlíkové řetězce mastných kyselin se sudým počtem atomů uhlíku v molekule [35].

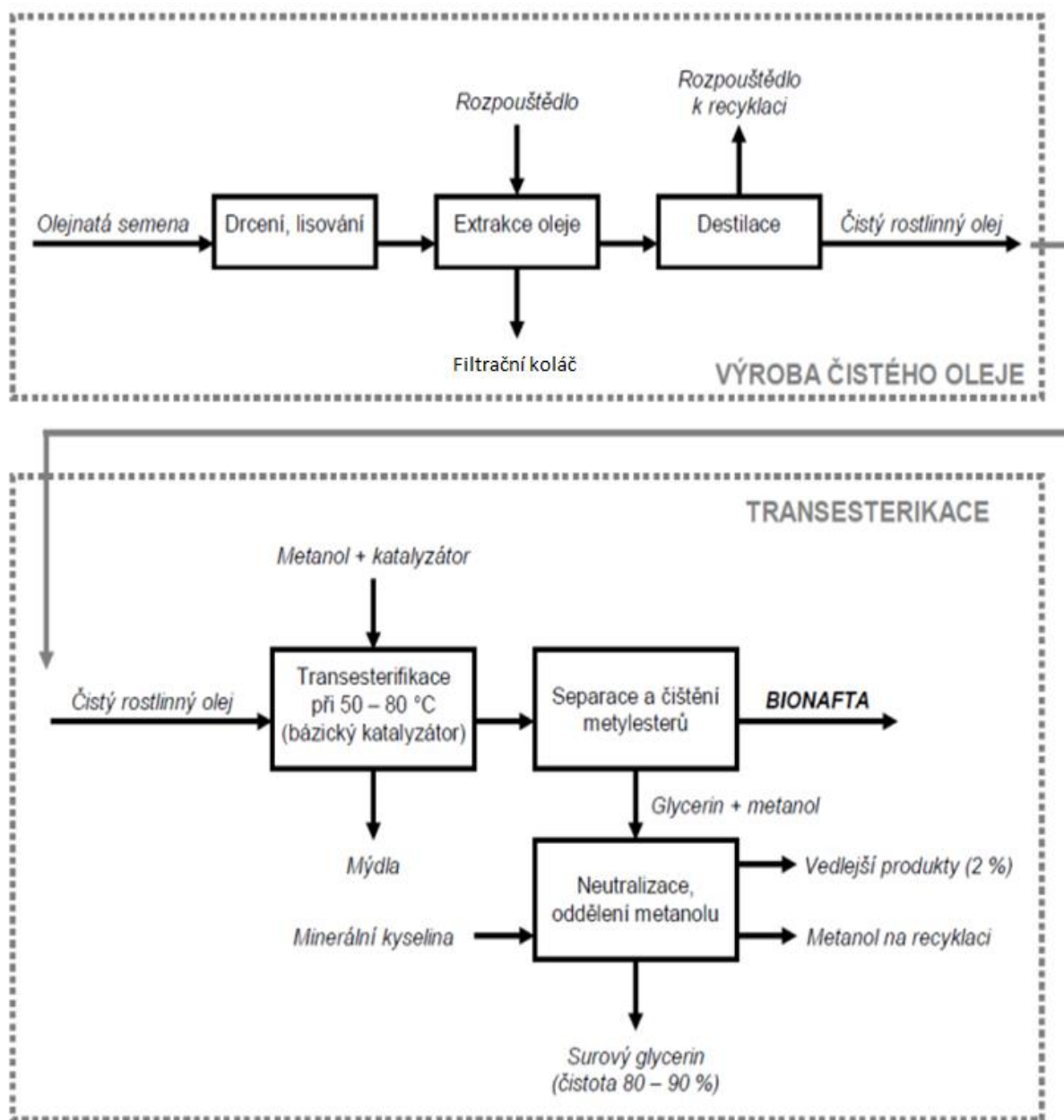


Obrázek 10 Základní schéma transesterifikace [54]

Při výrobě FAME z rostlinných olejů je první fází výroby lisování oleje. Kromě lisování lze čistý rostlinný olej získat také pomocí extrakce nebo kombinací obou těchto postupů. Vedlejším produktem jsou zde řepkové výlisky tzv. pokrutiny, ty obsahují 1216 % hm. zbytkového oleje (při využití kombinace lisování a extrakce obsahují pouze kolem 2 % zbytkového oleje) a společně s extrahovanými šroty mají další využití ve výživě hospodářských zvířat, kde jsou vyhledávaným bílkovinným aditivem krmných směsí. Olej získaný tímto způsobem má však zpravidla vysoký podíl fosforu, který musí být před dalším zpracováním odstraněn. Pro dosažení větší výtěžnosti oleje je možné při extrakci využít také organických rozpouštědel. Poté však nejsou extrahované šroty již nadále využitelné v krmných směsích [35; 54].

Další fází je chemické převedení získaného oleje do formy metylesterů mastných kyselin. Zde je nejdříve použitý katalyzátor rozpuštěn v metanolu. Jako katalyzátor se používá hydroxid draselný nebo sodný. Roztok hydroxidu draselného nebo hydroxidu sodného v metanolu je poté společně s rostlinným olejem dávkován do uzavřeného reaktoru na transesterifikaci. U surovin je potřeba kontrolovat obsah volných mastných kyselin a vody. Velké množství volných mastných kyselin může totiž způsobit zmýdelnění (sponifikaci) a další problémy, ke kterým může docházet během oddělování glycerolu z reakční směsi. Reakční doba se pohybuje v rozmezí od 1 do 8 hodin a reakční teplota v rozmezí 50-80 °C. U jednotek s menší výrobní kapacitou se obvykle používá vsádkový reaktor, při použití míchaných

reaktorů nebo reaktorů s pístovým tokem je ale možné pracovat i kontinuálně. Reakce musí být katalyzována především z důvodu provedení reakce při nízké teplotě a nízkém tlaku a dosažení přímé a dostatečně vysoké konverze (cca 98 %) při relativně krátkých reakčních časech [35].



Obrázek 11 Blokové schéma výroby bionafty [35]

V průběhu transesterifikace, jak zobrazuje Obrázek 11, se z triglyceridu postupně uvolní acylové zbytky, které se naváží na metanol. Společně s metylesterem vzniká diglycerid a monoglycerid, ze kterého se uvolní glycerin. Ten má pouze omezenou rozpustnost v tucích a metylesterech a z reakční směsi se odděluje v podobě sedimentu. Tímto způsobem se získané FAME čistí a izoluje od surového glycerinu. Rafinovaný glycerin je v průmyslu, zejména chemickém, žádaným produktem [54].

2.4.3.2 Vlastnosti FAME jako paliva

Metylestery masných kyselin jsou svými vlastnostmi relativně podobné běžné motorové naftě. Molekuly FAME obsahují vázaný kyslík, z tohoto důvodu vyžaduje jeho spalování méně kyslíku ze vzduchu. S tím souvisí i výhřevnost bionafty, která je v porovnání s minerální motorovou naftou mírně nižší. Bionafta má vyšší cetanové číslo, díky kterému se snadno vznítí a není potřeba upravovat kompresní poměr motoru (viz Tabulka 3). Oproti běžné motorové naftě má větší hustotu a viskozitu, ve srovnání s čistým rostlinným olejem je viskozita však nižší. Nízký tlak par a nižší tepelná vodivost je příčinou pomalejšího odpařování tohoto paliva [35].

Tabulka 3 Porovnání vybraných vlastností bionafty a motorové nafty [35]

Vlastnosti Paliva		Bionafta	Motorová nafta
Relativní molekulová hmotnost	[g/mol]	~ 300	170 - 200
Cetanové číslo	[-]	~ 54	51
Hustota při 15°C	[g/cm ³]	0,88	0,84
Výhřevnost	[MJ/kg]	37,3	42,7
Výhřevnost	[MJ/l]	32	35,7
Stechiometrický poměr vzduch/palivo	[hm.]	12,3	14,53
Obsah kyslíku	[% hm.]	9 - 11	< 0,6
Kinematická viskozita při 20°C	[mm ² /s]	7,4	4
Bod vzplanutí	[°C]	91 - 135	77

Bionafta je snadno biologicky odbouratelná, což je v případě úniku do životního prostředí výhoda, protože nedochází k takovému poškození, jako při úniku ropy nebo ropných frakcí. Na druhou stranu je díky tomu bionafta náchylnější k mikrobiálnímu napadení v palivové soustavě či jiných skladovacích nádržích. Bionafta má výborné mazací schopnosti, což snižuje opotřebení motoru. Další pozitivní vlastností při použití bionafty je snížení teploty výfukových plynů, to má za následek menší tepelné namáhání motoru. Je však třeba počítat i s jejími negativními vlastnostmi. Takovými vlastnostmi jsou například afinita k vodě (voda může vést ke korozi a následným problémům, lze jí však předcházet vhodnými aditivami), horší materiálová snášenlivost (bionafta je agresivnější vůči pryžovým hadicím, těsněním a nátěrům, také způsobuje korozi olova jeho slitin) nebo špatný vliv na motorové oleje (způsobuje tzv. „želatinaci“ oleje). Při nižších teplotách musí být bionafta aditivována z důvodu špatných chladivých vlastností [54; 55; 56].

2.4.3.3 Použití FAME ve vznětových motorech

V současné době lze v České republice natankovat dvě paliva s vysokým podílem FAME. Prvním z těchto paliv je čistá bionafta (B100), která obsahuje pouze metylestery mastných kyselin a její kvalita je v Evropské unii předepsána normou EN 14214+A2. Druhým palivem s vysokým obsahem FAME je „směsná motorová nafta“ (B30/SMN30), někdy také označovaná jako ecodiesel. Jedná se o palivovou směs minerální motorové nafty a bionafty, kvalitativní parametry tohoto paliva jsou zakotveny v normě ČSN 65 6508, která mimo jiné předepisuje minimální obsah FAME, respektive MEŘO, na 31 % (V/V). Směsnou motorovou naftu i čistou bionaftu lze z technického hlediska použít jako palivo pro běžné vznětové motory bez jakýchkoliv úprav. Z hlediska legislativního je však nutné schválení a zápis těchto paliv do technického průkazu vozidla, jinak by jejich natankováním došlo k porušení zákona č. 56/2001 Sb., výrobci vozidel navíc většinou tato paliva z řady důvodů oficiálně neschvalují [2; 56].

Jedním z těchto důvodů je například zvýšené riziko mikrobiálního napadení bionafty v palivové soustavě zapříčiněné snadnou biologickou odbouratelností bionafty. Biologický rozklad bionafty zde vede k tvorbě kyselých úsad poškozujících konstrukční materiály palivové soustavy. Dalším důvodem je fakt, že bionafta může působit agresivně na některé gumy a pryže. V dnešní době se však již používají materiály odolné vůči působení bionafty, tudíž vyšší agresivita bionafty působí problémy spíše ve vozidlech staršího data výroby, kde může dojít k vymytí aditiv z některých plastových a pryžových komponent. Dobré rozpouštěcí schopnosti bionafty mohou, při přechodu z používání běžné motorové nafty na bionaftu nebo směsnou motorovou naftu, způsobit uvolnění úsad, vzniklých při předchozím provozu na motorovou naftu. Tyto úsady následně ucpávají palivový filtr. Při přechodu z běžné motorové nafty na palivo s vysokým obsahem FAME je tedy nutné tomuto jevu věnovat patřičnou pozornost a palivový filtr případně i opakovaně vyměnit. Bionafta má relativně vysoký bod varu, což může zapříčinit její pronikání do motorového oleje ve zvýšené míře. Bionafta má sice poměrně dobré mazací schopnosti a její přítomnost v motorovém oleji způsobuje nejprve pokles viskozity, ale vlivem tepelného namáhání postupně dochází k její oxidaci, která následně vede k degradaci motorového oleje projevující se především extrémním nárůstem jeho viskozity. Proto je při spalování paliv s vysokým obsahem FAME vhodné provádět výměnu motorového oleje v kratších intervalech než u běžné motorové nafty. Obsah glycerolu a glyceridů v bionaftě přispívá k zanášení a korozi součástí s měděným a zinkovým povrchem (neželezné kovy), fosfor obsažený v bionaftě zase napomáhá růstu mikroorganismů a jeho výskyt ve spalinách

snižuje životnost katalyzátoru. Používání paliv s vysokým obsahem FAME také vede k tvorbě karbonových úsad, především při nízkém zatížení motoru může docházet k tvorbě úsad na vstřikovacích tryskách a v drážkách pístních kroužků, to může dále způsobit zhoršení exhalačních parametrů, zvýšení spotřeby a snížení výkonu motoru. Výše zmíněné problémy se pochopitelně u čisté bionafty (B100) projevují ve větší míře než u směsné motorové nafty (SMN30) [35; 56].

Nižší energetický obsah a s ním spojená nižší výhřevnost FAME v porovnání s běžnou motorovou naftou má za následek snížení výkonu a zvýšení měrné spotřeby paliva. Při spalování čisté bionafty je výkon motoru nižší o 2,5 % až 10 % a nárůst měrné spotřeby paliva se pohybuje v rozmezí 6 % až 10 % oproti běžné motorové naftě. Z hlediska emisí dochází při spalování bionafty oproti běžné motorové naftě k poklesu emisí většiny sledovaných polutantů. Jelikož převážná část molekul bionafty pochází z obnovitelných zdrojů, vede její spalování také ke snížení emisí oxidu uhličitého. Vzhledem k tomu, že molekuly bionafty obsahují kyslík, tak při jejím spalování dochází k dokonalejšímu hoření, což se projevuje nižší tvorbou produktů nedokonalého spalování (oxid uhelnatý a uhlovodíky). Vyšší obsah kyslíku společně s nižším obsahem aromatických sloučenin v bionaftě, potažmo i směsné motorové naftě dále vede k poklesu emisí pevných částic. Na druhou stranu však tento vyšší obsah kyslíku v palivu způsobuje zvýšení emisí NO_x [35; 56].

FAME má z hlediska objemu spotřeby však nejvyšší význam jako plošný přírůstek do běžné motorové nafty. Ta může dle normy ČSN EN 590+A1 obsahovat až 7 % FAME a z důvodu plnění celoevropského plánu na využití biopaliv v dopravě se této možnosti využívá. Česká republika aktuálně podle zákona č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší stanoví minimální podíl biopaliva 6 % z celkového množství motorové nafty. Zde jsou rizika spojená s použitím FAME minimalizována na přijatelnou úroveň jeho nízkým obsahem v palivové směsi [2].

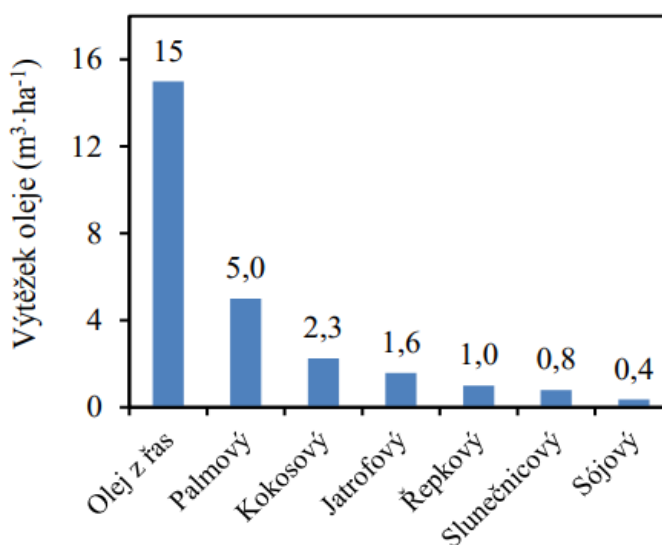
Z výše uvedeného vyplývá, že používání bionafty s sebou přináší řadu problémů, se kterými je potřeba počítat. Jednou z neproblematičtějších vlastností bionafty je její nízká oxidační stabilita zapříčiněná přítomností dvojných vazeb v řetězcích nenasycených mastných kyselin vázaných v molekulách FAME. Výsledné produkty této oxidace jsou, kromě látek s nižší molekulovou hmotností, než měly původní molekuly bionafty, i látky s vyšší molekulovou hmotností, tyto vysokomolekulární nerozpustné látky poté vytvářejí pryskyřičné úsady, jež způsobují celou řadu dalších problémů. To je důvodem, proč dlouhodobě skladované zásoby motorové nafty nesmí obsahovat FAME. Možností, jak tento problém vyřešit, je zpracování rostlinných olejů pomocí hydrogenace namísto transesterifikace. Hydrogenace

poskytuje bezkyslíkaté produkty, ty mají lepší oxidační stabilitu a vyšší cetanové číslo než produkty transesterifikace [2].

2.4.4 Hydrogenovaný rostlinný olej (HVO)

Hydrogenovaný rostlinný olej neboli HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) je čiré parafinické palivo bez zápachu, s chemickou strukturou C_nH_{2n+2} , k jehož výrobě může být použit téměř každý rostlinný olej. V současné době je dominantní využití řepkového oleje v Evropě a oleje ze sójových bobů v USA. V jihovýchodní Asii se, díky svému širokému použití, jako výhodná surovina pro výrobu HVO jeví palmový olej. Ten má však stejně jako kokosový olej vysoký obsah nasycených triacylglycerolů, které snižují nízkoteplotní vlastnosti výsledného produktu a bez dalších úprav jej lze využívat pouze v teplých oblastech. Další surovinou, kterou lze pro výrobu HVO využít, je jatrofový olej získávaný z divoce rostoucí rostliny jatrofa. Tato rostlina roste i na suchých a nehostinných místech bez zavlažování, je málo náchylná k napadení škůdci, netrpí na choroby a je pro lidi jedovatá, díky čemuž vzrůstá možnost jejího využití jako zdroje biopaliv, protože nekonkuruje běžně pěstovaným rostlinám na potravinářské účely. Dnes je také za velmi perspektivní surovinu pro výrobu HVO považován olej vyráběný z řas. Řasami jsou zde myšleny všechny druhy řas potenciálně schopné produkovat oleje. Olej získaný z řas je svým složením podobný oleji ze sójových bobů a je zde předpoklad, že ho bude možné v budoucnu vyrábět průmyslově. Zatím je ale výroba olejů vhodných na výrobu biopaliv z řas pouze ve fázi výzkumu a vývoje [2].

Na Obrázku 12 jsou porovnány typické výtěžky oleje výše uvedených rostlin. Výtěžky oleje jsou však velmi závislé na odrůdě, zavlažování, kvalitě půdy, hnojení a dalších podmínkách pěstování těchto rostlin, je tedy potřeba počítat s jejich velkým rozmezím [2].



Obrázek 12 Typický výtěžek oleje z jednotlivých surovin [2]

Jako surovina pro výrobu hydrogenovaného rostlinného oleje mohou být také použity živočišné tuky, jakými jsou například hovězí lůj či drůbeží tuk. Tyto suroviny jsou relativně levné a dostupné v hojné míře. Používají se však rovněž v potravinářském průmyslu, což by v budoucnu při masivnější výrobě HVO mohlo způsobit jejich nedostatek [1].

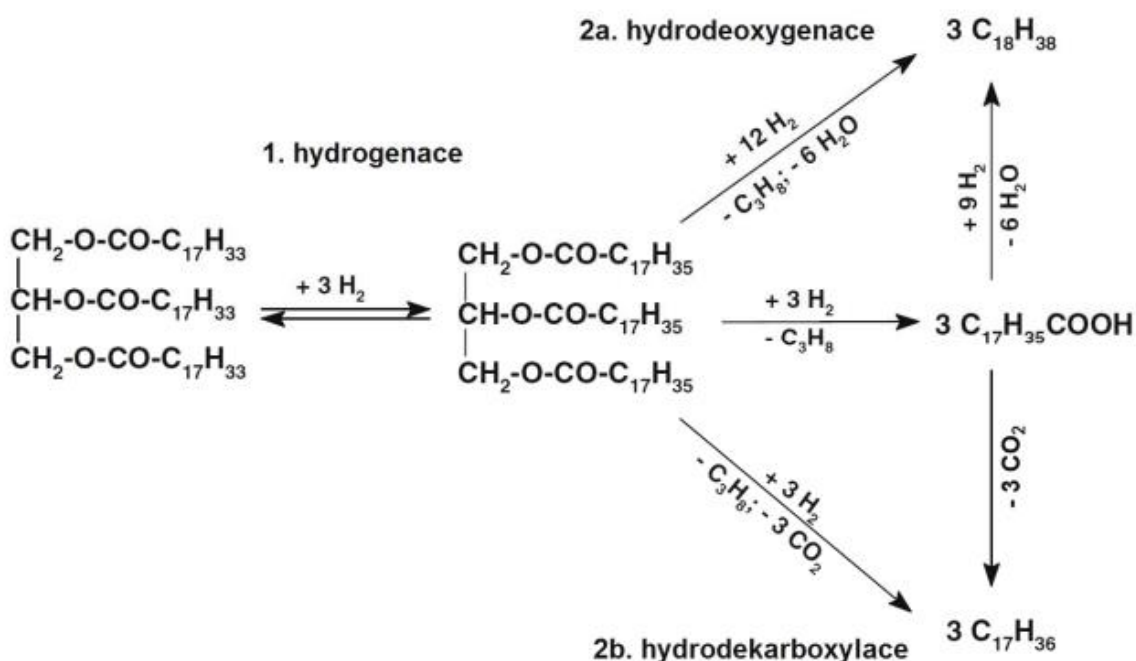
Poslední surovinou, kterou lze pro výrobu hydrogenovaného rostlinného oleje využít, jsou odpadní rostlinné nebo živočišné tuky, jako například rybí tuk, fritovací oleje či odpadní tuk z rafinace olejů. Tyto tuky nemají téměř žádné jiné využití a běžně končí jako odpad. Z tohoto důvodu se jejich použití pro výrobu biopaliv jeví jako velmi efektivní a ekologická metoda jejich zpracování. Odpadní původ biomasy u tohoto produktu poněkud lépe vystihuje označení HEFA (hydrotreated esters and fatty acids) namísto HVO [1; 57].

2.4.4.1 Výroba HVO

Hydrogenovaný rostlinný olej se vyrábí pomocí procesu hydrogenační přeměny rostlinných olejů na uhlovodíky. Pro tento proces se používají různé termíny, nejčastěji se používá termín hydrogenace, lze se ale setkat i s pojmem hydrokrakování nebo též hydrodeoxidace. Proces katalytické hydrogenace rostlinných olejů je známá technologie, která je používána v potravinářském průmyslu za účelem ztužování tuků. Zde je však cílem částečná nebo úplná hydrogenace uhlovodíkových řetězců nenasycených mastných kyselin vázaných v molekulách triacylglycerolů. Chemická podstata esterových skupin zde ale zůstává zachována, zatímco v případě hydrogenace rostlinných olejů za účelem výroby diesellových paliv nejsou žádaným produktem triglyceridy mastných kyselin, ale uhlovodíky. Dochází zde tedy k daleko významnějším chemickým změnám, což vyžaduje vyšší reakční teplotu a tlak [1].

Proces hydrogenace probíhá ve vodíkové atmosféře při teplotách v rozmezí 300–420 °C a celkovém tlaku do 20 MPa. Zde dochází k mnoha dílčím chemickým reakcím, jejichž výsledkem je přeměna rostlinných olejů, respektive triglyceridů mastných kyselin na poměrně jednoduchou směs uhlovodíků. Jako katalyzátory lze použít stejné typy katalyzátorů jako při hydrogenační rafinaci ropných produktů, tedy kombinaci kovů, jakou jsou Ni, Mo, Co a W nanesených na vhodném nosiči, kterým bývá nejčastěji alumina nebo zeolity. Je popsáno i použití katalyzátorů na bázi drahých kovů (Pd a Pt). Jak je možné vidět na Obrázku 13, kde je zobrazeno zjednodušené reakční schéma hydrogenace rostlinných olejů (rostlinný olej je zde pro zjednodušení reprezentován molekulou trioleinu), tak nejprve dochází k nasycení dvojných vazeb uhlovodíkových řetězců mastných kyselin vázaných v molekulách triglyceridů, teprve poté dochází k vlastnímu štěpení nasycených triglyceridů, a to dvěma možnými způsoby. Prvním způsobem je hydrodeoxygenace, kde dochází k rozpadu molekul triglyceridu za tvorby

propanu, 6 molekul vody a 3 molekul *n*-alkanů, které mají shodný počet uhlíkových atomů, jako mastné kyseliny vázané v původních molekulách triglyceridu. Nejvíce jsou v triglyceridech zastoupeny kyseliny s osmnácti uhlíkovými atomy, proto je produktem hydrodeoxygenace *n*-oktadekan ($C_{18}H_{38}$). Druhou možnou reakční cestou rozkladu triglyceridu je hydrodekarboxylace, při které vzniká propan, 3 molekuly oxidu uhličitého a 3 molekuly *n*-alkanů s o jedno nižším počtem atomů uhlíku, než měly původní mastné kyseliny vázané v triglyceridu. Hlavním produktem je zde tedy *n*-heptadekan ($C_{17}H_{36}$) [1; 58].



Obrázek 13 Zjednodušené reakční schéma hydrogenace rostlinného oleje [1]

Pokud k přeměně dojde pouze pomocí hydrodekarboxylační cesty, tak se snižuje výtěžek uhlovodíků asi o 5 % v porovnání s hydrodeoxygenací. To je zapříčiněno ztrátou uhlíku v podobě CO_2 . Nevýhodou hydrodeoxygenační cesty je, že ke vzniku uhlovodíků celkově vyžaduje až čtyřnásobné množství vodíku oproti hydrodekarboxykaci. Pro hydrogenaci rostlinných olejů se dnes používají oba z výše popsaných mechanismů, přičemž se jejich konkrétní rozsah liší v závislosti na reakčních podmínkách a použitém katalyzátoru. Při vyšších reakčních teplotách dochází s dostatečnou rychlostí také k izomeraci *n*-alkanů na isoalkany, v daleko menší míře pak probíhá i cyklizace a dehydrocyklizace *n*-alkanů na cykloalkany a aromáty. Rozsah těchto dvou reakcí je však velice malý a z důvodu zjednodušení nejsou na Obrázku 13 uvedeny. Při vyšších reakčních teplotách může také výrazněji docházet ke štěpení primárních uhlovodíkových produktů, takže výsledný produkt poté může obsahovat větší množství níževroucích uhlovodíků [1; 59].

Z důvodu nepříznivých nízkoteplotních vlastností HVO, které značně limitují jeho využití, se v komerčním měřítku produkce uplatnila dvoustupňová výroba HVO. Ta v prvním stupni zahrnuje výše zmíněnou hydrogenaci, po které ve druhém stupni následuje izomerace. Při té se přeměňují *n*-alkany na isoalkany, obsah *n*-heptadekanu a *n*-oktadekanu ve finálním produktu tedy dramaticky klesne, díky čemuž se nízkoteplotní vlastnosti zlepší natolik, že je pak HVO z tohoto hlediska plně srovnatelné s běžným typem zimní motorové nafty (třída F) nebo dokonce lepší. Všechny ostatní výhody HVO, včetně velmi vysokého cetanového čísla, přitom zůstanou zachovány [1; 59].

Z výše uvedeného je patrné, že hlavním produktem procesu hydrogenace rostlinných olejů je uhlovodíková směs, která svým destilačním rozmezím odpovídá motorové naftě (cca 200–360 °C). Během průmyslové výroby HVO ale rovněž vzniká menší množství lehčích uhlovodíků, jejichž podíl je možné do určité míry ovlivnit provozními podmínkami. Kromě HVO určeného pro vznětové motory zde tedy také vzniká specifická obdoba benzinu a petrolejové frakce, které lze využít jako alternativní palivo pro letecké turbínové motory. Nelze také opomenout fakt, že při hydrogenaci vznikne z 1 tuny zpracovaného rostlinného oleje nebo živočišného tuku přibližně 50 kg biopropanu, který lze dále využít [1].

2.4.4.2 Vlastnosti HVO jako paliva

Čisté uhlovodíkové směsi s dominantním zastoupením *n*-heptadekanu a *n*-oktadekanu jsou primárními produkty procesu hydrogenace a obvykle tvoří více než 50 % HVO. V menším množství obsahují hydrogenované rostlinné oleje i vyšší (do C₂₄) a nižší (C₁₅ a C₁₆) *n*-alkany, jejich množství je závislé na složení rostlinných olejů použitých k výrobě. Zbytek uhlovodíků je převážně ve formě isoalkanů (C₁₇ a C₁₈). Všechny výše jmenované uhlovodíky jsou nasycené a jsou přirozenou součástí běžné motorové nafty vyrobené z ropy, na rozdíl od ní zde však nejsou přítomné téměř žádné aromatické uhlovodíky. Díky tomuto specifickému složení uhlovodíků má HVO v porovnání s běžnou motorovou naftou relativně nízkou hustotu a mírně vyšší viskozitu. Absence dvojných vazeb v molekulách HVO téměř vylučuje problémy s oxidační stabilitou, které jsou známé u FAME. Nedostatek hydrogenovaných rostlinných olejů spočívá v nevyhovujících nízkoteplotních vlastnostech toho paliva, to je zapříčiněno právě vysokým obsahem *n*-heptadekanu a *n*-oktadekanu, jež mají sice vysoké cetanové číslo, ale také vysoký bod tání. Dopady těchto nepříznivých nízkoteplotních vlastností se dají zmírnit použitím hydrogenovaných rostlinných olejů pouze jako složky do motorové nafty, díky čemuž dojde ke zvýšení cetanového čísla, ovšem za cenu zhoršení nízkoteplotních vlastností nebo úplného odstranění izomerací (viz kapitola 2.4.4.1) [1; 60].

Svémi vlastnostmi se HVO velmi přibližuje motorové naftě, dokonce ji v mnoha parametrech i překonává. Na rozdíl od ní neobsahuje aromatické látky, kyslík nebo síru. Má znatelně vyšší cetanové číslo a jeho výhřevnost je také mírně vyšší. Tyto parametry příznivě ovlivňují provozní parametry motoru a jeho emise. Nižší hustota HVO však může mít negativní vliv na výkon motoru a snižuje množství, které lze přimíchávat do motorové nafty z důvodu dodržení palivových norem. HVO jako palivo nemá žádné zvláštní dopravní nebo logistické omezení, díky čemuž se u něho dají využít již stávající skladovací a distribuční kapacity, což z praktických i ekonomických důvodů usnadňuje rozšíření tohoto paliva. Ve srovnání s FAME mají hydrogenované rostlinné oleje velice dobrou oxidační stabilitu a materiálovou kompatibilitu, díky které lze na rozdíl od bionafty toto biopalivo používat i bez speciálních úprav palivového nebo vstřikovacího systému. Nevýhodou HVO oproti FAME jsou naopak nízké mazací schopnosti paliva. Podrobnější porovnání vybraných vlastností motorové nafty, MEŘO a NExBTL (komerční označení HVO od firmy Neste Oil) je uvedeno v Tabulce 4 [2; 61].

Tabulka 4 Porovnání vybraných vlastností motorové nafty, MEŘO a NExBTL [1]

Parametr	Motorová nafta	MEŘO	NExBTL
Výhřevnost [MJ·kg ⁻¹]	43,1	37,2	44,1
Hustota při 15 °C [kg·m ⁻³]	833,5	882,5	778,6
Kin. Viskozita při 40 °C [mm ² ·s ⁻¹]	2,66	4,63	2,89
Cetanové číslo	52,2	58,5	93,1
Bod vzplanutí [°C]	60	>120	83
Filtrovatelnost – CFPP [°C]	-24	-26	-38
Oxidační stabilita [h]	196,1	9,8	30,8
Celkový obsah aromátů [hm. %]	25	<0,1	0,2
Obsah polycyklických aromatických uhlovodíků [hm. %]	2,88	<0,01	<0,01
Obsah síry [mg·kg ⁻¹]	8	4	<2

2.4.4.3 Použití HVO ve vznětových motorech

Hydrogenovaným rostlinným olejem lze, stejně jako v případě FAME, aditivovat motorovou naftu až do koncentrace 100 %, a to bez nutnosti modifikace motoru. V České republice se s tímto palivem lze setkat v čisté podobě a jeho kvalita je určena normou ČSN EN 14214+A2. Druhou možností, jak se s tímto biopalivem setkat, je ve směsi

s motorovou naftou. V tomto případě je však z důvodu dodržení normy ČSN EN 590+A1 jeho obsah maximálně 30 % hm. Limitujícím faktorem je zde hustota, jejíž dolní hranice je pro motorovou naftu určenou pro mírné klima stanovena hodnotou 820 kg/m³. Takovéto směsné palivo (pokud neobsahuje FAME) je potřeba, stejně jako v případě běžné motorové nafty, aditivovat mazivostními přísadami. Hranice 30 % hm. je dle zákona o spotřebních daních zároveň limitem pro daňové zvýhodnění paliva. Samotné jakostní parametry HVO jsou pak dány normou ČSN EN 15940+A1+AC [4; 61; 62].

V České republice se výrobou HVO zabývá několik firem, přičemž nejvýznamnější z nich je firma Unipetrol. Její dceřiná firma Benzina soudí, že použití HVO je vhodnou variantou ke splnění cíle Evropské unie snížit emise v dopravě a lze ho najít v jejich palivech s označením Verva Diesel, které jsou k dostání na již více než 70 % čerpacích stanicích této značky v ČR a obsah HVO v nich tvoří 30 %. Dalším zástupcem paliva s obsahem HVO na Českém trhu je Maxxmotion Diesel dostupný na čerpacích stanicích OMV. Koncern OMV odebírá hydrogenovaný rostlinný olej od největšího evropského výrobce HVO, kterým je firma Neste Oil [1; 63].

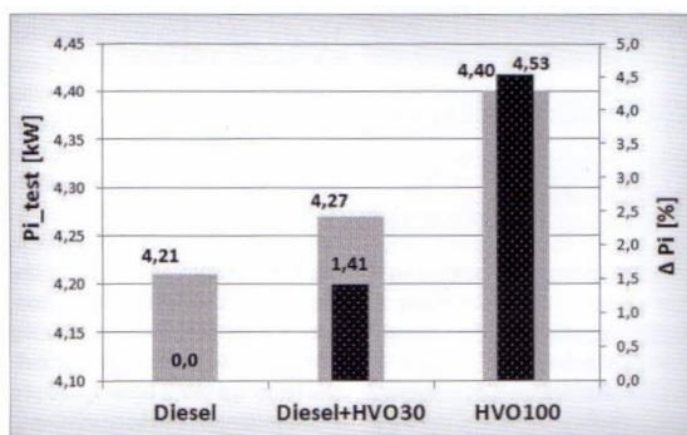
Aromatické uhlovodíky mají při spalování větší sklon k tvorbě pevných částic, díky jejich téměř úplné absenci v HVO tedy nedochází pouze ke zvýšení cetanového čísla, ale také ke snížení tvorby pevných částic během jeho spalování. Tento fakt byl prokázán mnoha studii a měřeními. Kromě snížení počtu vzniklých pevných částic během spalování bylo také prokázáno snížení ostatních složek regulovaných emisí (HC, CO a NO_x). U čistého hydrogenovaného rostlinného oleje se ve srovnání s motorovou naftou jedná o snížení 25–46 % v případě PM, 6–16 % v případě NO_x a v případě snížení emisí HC a CO dochází ke snížení až o 50 %, respektive 80 %. Firma Scania, která vyvíjí a testuje provoz svých modelů nákladních automobilů s motory splňujícími normy Euro V a VI, hovoří v případě použití HVO jako paliva o snížení emisí CO₂ až 85 %. Společnost DAF poté dokonce zmiňuje jejich motory, které při spalování HVO sníží emise CO₂ o 90 % [1; 61; 64; 65].

2.4.4.4 Vliv HVO na provozní parametry vznětového motoru

Jedno z výše zmiňovaných měření bylo uskutečněno ve Výzkumném ústavu zemědělské techniky v Praze, kde byly testovány a vyhodnoceny vliv tří směsí paliv s 0 %, 30 % a 100 % podílem HVO na souhrnné energetické a emisní parametry vtažené na indikovaný výkon. Pro test paliv byl zvolen experimentální vznětový jednoválec „AVL typ 5402.088 instalovaný v sestavě AVL Compact Single Cylinder Test Bed“, který nebyl upraven žádným zařízením pro úpravu výfukových plynů. Motor disponoval suchou klikovou skříní a neměl

vlastní čerpadlo na olej a chladicí médium. Vzduch nasávaný do motoru byl připravován zařízením AVL 515, které udržovalo konstantní plnicí tlak a teplotu nasávaného vzduchu. Výfuk byl vybaven uklidňovací nádobou, za níž byla umístěna proporcionálně řízená škrtková klapka kontrolující protitlak ve výfuku, což do značné míry umožnilo nezávislé nastavení plnicího a výfukového tlaku. Odběr pro všechny sledované vzorky emisí byl realizován z výfukového potrubí. Pro měření bylo vybráno 12 kombinací otáček a zatížení motoru, které byly vybrány na základě třináctibodového cyklu WHSC, přičemž první a poslední bod byl měřen dvakrát. Celý cyklus byl poté modifikován tak, aby bylo dosaženo potřebného ustálení měřených veličin v každém bodě. Pro gravimetrické stanovení hmotnosti emitovaných částic byla každému bodu přidělena váha, s jejíž využitím byla vypočítána celková hodnota za cyklus jako vážený průměr hodnot naměřených v jednotlivých bodech. Pro interpretaci zatížení byla použita hodnota středního indikovaného tlaku ve válci. Všechny emisní a energetické parametry motoru jsou tedy vztaženy k indikovanému výkonu [66].

Porovnání středního indikovaného výkonu motoru je možné v grafické podobě vidět na Obrázku 14. Po dobu měření narostl P_i o 1,38 %. Z naměřených výsledků je patrné, že indikovaný výkon P_i se zvyšující koncentrací HVO v palivu roste. Trend lze považovat za prokázáný díky jednoznačnosti jeho průběhu a faktu, že nejvyšší dosažený rozdíl 4,53 % je vyšší než dosažená chyba opakovatelnosti měření [66].



Obrázek 14 Porovnání středního indikovaného výkonu a relativního indikovaného výkonu [66]

Vliv koncentrace HVO v palivu na měrnou spotřebu a na vznik jednotlivých emisních složek je uveden v Tabulce 5. Z výsledků je patrný příznivý vliv zvyšující se koncentrace HVO na snížení měrné spotřeby. Na tento výsledek měl vliv vyšší dosažený indikovaný výkon pro vyšší koncentrace HVO a nižší hustota HVO v porovnání s motorovou naftou [66].

Byl také prokázán pozitivní vliv zvyšující se koncentrace HVO v palivu na emise CO. Během měření byl zjištěn mírný pokles koncentrace CO₂ se zvyšující se koncentrací HVO. Ten

byl nejspíše zapříčiněn odlišným podílem uhlíku v palivu. Výsledky ukazují na snížení koncentrace NO_x, průběh této závislosti zde ale není zcela hladký. Jasný pozitivní dopad zvyšujícího se obsahu HVO v palivu však ukazují emise nespálených uhlovodíků. Dalším sledovaným parametrem, na který měla vyšší koncentrace HVO pozitivní dopad, je úroveň množství částic ve výfukových plynech, trend zde má čitelný průběh. Při sledování produkce pevných částic bylo zjištěno velmi výrazné snížení jejich produkce, a to zejména u čistého HVO. Měření viditelného kouře v podobě vyhodnocení opacity ukázalo proporcionální pokles kouřivosti se zvyšujícím se podílem HVO v palivu. Měření kouřivosti přineslo podobné výsledky jako v případě měření opacity [66].

Tabulka 5 Výsledky testovaných vzorků paliv [66]

Označení paliva	Motorová nafta	Směsné palivo Motorová nafta 70 % + HVO30 %	HVO100
Obsah HVO [%]	0	30	100
Teplota vzduchu [°C]	20,9–22,5	18,3–22,9	23,3–23,9
Vlhkost vzduchu [%]	20,7–23,6	28,6–37,6	25,2–26,4
Číslo filtru pro PM	2	3	4
mCO ₂ _test [mg/kWh]	4400	3273	1679
mCO ₂ _test [g/kWh]	580	569	559
mNO _x _test [mg/kWh]	7036	6780	6738
mHC_test [mg/kWh]	275	188	98
nsfc_test [g/kWh]	185,74	181,64	177,36
PN_test [#kWh]	1,60E+13	1,50E+13	1,20E+13
Test opacity prům. [HSU]	6,30E-01	5,70E-01	4,60E-01
Test kouřivosti prům. [FSN]	7,30E-02	6,70E-02	5,40E-02
PM [mg/kWh]	0,106	0,052	0,021
Pi_test [kW]	4,214	4,273	4,405
Relativní vyjádření vzhledem k referenčnímu palivu (motorové naftě)			
mCO ₂ _test [%]	0	-25,6	-61,8
mCO ₂ _test [g/kWh]	0	-1,8	-3,6
mNO _x _test [%]	0	-3,6	-4,2
mHC_test [%]	0	-31,5	-64,3
nsfc_test [%]	0	-2,2	-4,5
PN [%]	0	-10,5	-24,5
Test opacity prům. [HSU]	0	-9,3	-26,9
Test kouřivosti prům. [FSN]	0	-7,6	-25,6
PM [%]	0	-50,9	-80,2
Δ Pi_test [%]	0	1,4	4,5

Celkově lze tedy konstatovat, že zvyšující se koncentrace HVO v palivu má mírně pozitivní vliv na indikovaný výkon a měrnou spotřebu. Na množství emitovaných oxidů dusíku výrazný vliv nemá. Velmi pozitivně se projevuje na kouřivosti a množství emitovaných částic. To stejné lze říci v případě emisí oxidu uhelnatého a uhlovodíků. Z hlediska sledovaných parametrů tedy neměl podíl HVO žádný negativní vliv, ale pouze vlivy pozitivní [66].

3 Cíl práce

Obecným cílem diplomové práce je přispět ke zlepšení ekonomičnosti provozu vznětových motorů a snaze o zlepšení životního prostředí a snížení emisí skleníkových plynů použitím vybraných směsí paliva s hydrogenovaným rostlinným olejem.

Konkrétním cílem této diplomové práce je poté na základě literárního rozboru zvolit vhodnou směs paliva s hydrogenovaným olejem (HVO) a tuto směs prakticky porovnat ve vznětovém spalovacím motoru s klasickou motorovou naftou, a to z pohledu výkonových parametrů, emisí a spotřeby paliva.

Konkrétního cíle je dosaženo pomocí několika cílů dílčích:

- Experimentálním ověřením vlivu testovaných paliv na točivý moment a výkon motoru,
- experimentálním ověřením vlivu testovaných paliv na měrnou spotřebu vznětového motoru,
- experimentálním ověřením vlivu testovaných paliv na produkci sledovaných emisí.

4 Metodika práce

Praktická část diplomové práce byla realizována ve zkušební laboratoři Katedry jakosti a spolehlivosti strojů Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze na zvoleném spalovacím motoru, který byl zatížen dynamometrem, na němž byl použit vhodný zatěžovací cyklus, během něž byly sledovány výkonové parametry, emise a spotřeba paliva.

Metodika práce vychází z dílčích cílů, popisuje postup pro jejich dosažení a je inspirována předchozími studiemi autorů, které se již zabývaly problematikou využití hydrogenovaného rostlinného oleje jako biopaliva. Dále tato kapitola obsahuje popis základního použitého vybavení, měřicích zařízení a testovaných palivových směsí.

4.1 Testované palivové směsi

Pro experimentální měření byly připraveny dvě palivové směsi s různým poměrem HVO a motorové nafty, jako referenční palivo byla použita čistá motorová nafta bez přidaných biosložek. Obsah HVO v obou palivových směsích je relativně nízký a byl volen s ohledem na splnění standardů normy ČSN EN 590+A1, zároveň však stále představují jistý potenciál ke zlepšení provozních a emisních parametrů vznětových motorů.

Přehled testovaných paliv:

- 100 % motorová nafta (D100),
- 95 % motorové nafty a 5 % hydrogenovaného rostlinného oleje (HVO5),
- 90 % motorové nafty a 10 % hydrogenovaného rostlinného oleje (HVO10).

Jednotlivé fyzikálně-chemické vlastnosti jsou uvedeny v Tabulce 6. Hustota a viskozita testovaných paliv změřena za pomoci Stabingerova viskozimetru SVM 3000 od firmy Anton Paar GmbH (nepřesnost měření < 1 %, opakovatelnost = 0.1 %).

Tabulka 6 Fyzikálně-chemické vlastnosti testovaných paliv

Vlastnosti paliva	D100	HVO5	HVO10
Výhřevnost [MJ·kg ⁻¹]	43,15	43,19	43,23
Hustota při 15 °C [kg·m ⁻³]	835	833,3	830,27
Kin. viskozita při 40 °C [mm ² ·s ⁻¹]	2,587	2,649	2,623
Bod vzplanutí [°C]	60	-	-
Cetanové číslo [-]	51	-	-
Cetanový index [-]	52,2	-	-

4.2 Použité vybavení a měřicí aparatura

Experimentální měření proběhlo na traktoru Zetor Forterra 8641, který byl osazen motorem Zetor 1204. Jedná se o přeplňovaný vznětový motor s nájezdem cca 160 motohodin. Motor nebyl nijak upravován a nelišil se od sériové výroby, jeho technické specifikace jsou uvedeny v Tabulce 7. Motor nedisponuje filtrem pevných částic a splňuje emisní limity pro nesilniční vozidla dané normou TIER II. Emisní limity této normy lze vidět v Tabulce 8.

Tabulka 7 Technická specifikace motoru Zetor 1204 [67]

Parametr	Hodnota
Typ motoru [-]	Zetor 1204
Druh motoru [-]	Vznětový, přímé vstřikování
Provedení motoru [-]	Řadový, stojatý, chlazený vodou
Druh rozvodu [-]	OHV
Plnění [-]	Přeplňovaný turbodmychadlem
Počet válců [-]	4
Obsah válců [cm ³]	4156
Vrtání x zdvih [mm]	105 x 120
Kompresní poměr [-]	17
Jmenovité otáčky [ot·min ⁻¹]	2200
Maximální přeběhové otáčky [ot·min ⁻¹]	2460
Volnoběžné otáčky [ot·min ⁻¹]	750 ± 25
Čistý výkon při jmenovitých otáčkách [kW]	60
Maximální točivý moment [Nm]	351
Převýšení točivého momentu [%]	35
Měrná spotřeba při max. výkonu [g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹]	253
Úhel předstihu vstřikování [°]	12

Tabulka 8 Emisní limity TIER II [68]

Látka / ukazatel	Emisní limit [g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹]
CO	5
HC	1,3
NO _x	7
PM	0,4

Za účelem stanovení výkonových parametrů byl motor přes vývodový hřídel (PTO) zatížen tenzometrickým dynamometrem MAHA ZW-500. Tento dynamometr je vybaven dvěma brzdami na vířivý proud, pracuje s procentuální odchylkou menší než 1 % a je určen pro zemědělské stroje o maximálním výkonu 500 kW. Výkon motoru byl tedy přes zadní vývodový hřídel přenášen do dynamometru, pomocí kterého byly změřeny a zaznamenány otáčky PTO, přenesený točivý moment a výkon motoru. Převodový poměr mezi vývodovým hřídelem a klikovým hřídelem motoru je dán koeficient $k = 3,543$. Ztráty vzniklé přenosem výkonu mezi PTO a motorem nemají na porovnání výkonových parametrů žádný vliv, a proto nebyly uvažovány. Podrobnější technické parametry použitého dynamometru lze najít v Tabulce 9.

Tabulka 9 Technické parametry dynamometru MAHA ZW 500 [69]

Parametr	Hodnota
Maximální brzdny výkon [kW]	500
Maximální otáčky [$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$]	2500
Maximální točivý moment [Nm]	6600
Velikost hřídele ["]	1 $\frac{3}{4}$ (šesti drážkový)
Rozměry (d x š x v) [mm]	3 580 x 2 110 x 1 420
Hmotnost [kg]	1300

Pro měření spotřeby paliva byla vyžita laboratorní váha Vibra AJ 6200. Na této váze byla umístěna externí palivová nádrž. Tato laboratorní váha disponuje rozsahem 0 až 6 200 g, přesností 0,1 g a rozlišením 0,01 g.

K monitorování hmotnostního průtoku vzduchu byl použit průtokoměr Sierra FastFlo 620S. Tento průtokoměr disponuje odezvou 200 a měřicím rozsahem až do 100 m/s pro vzduch. Chyba měření je ± 1 % z měřicího rozsahu s opakovatelností 0,2 % z rozsahu.

Velikost a koncentrace pevných částic byla stanovena pomocí částicového analyzátoru EEPS 3090 značky TSI. Tento analyzátor odebírá surový vzorek části výfukových plynů a v rotační ředičce jej ředí stavitelným ředicím poměrem, poté umožňuje sledovat množství pevných částic obsažených ve výfukových plynech v jednotlivých velikostních spektrech a jejich dynamické změny v průběhu měření. Vybrané technické parametry tohoto částicového analyzátoru jsou uvedeny v Tabulce 10.

K měření teploty výfukových plynů byl využito čidlo teploty v podobě termočlánku typu K, který funguje na principu termoelektrického jevu, umístěné v tlumiči výfukového potrubí.

Tabulka 10 Technické parametry analyzátoru částic EEPS 3090 [70]

Parametr	Hodnota
Rozsah velikostí částic [nm]	5,6 – 560
Rozlišení [-]	16 kanálů na dekádu (32 celkem)
Vzorkovací frekvence [Hz]	10
Průtok vzorku [dm ⁻³ ·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

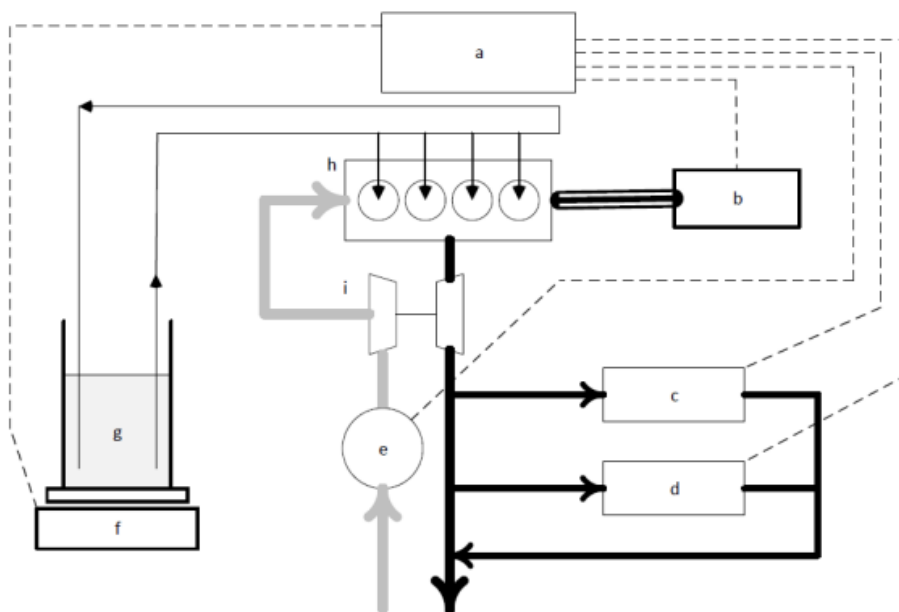
Ke zjištění obsahu emisí ve výfukových plynech byl použit emisní analyzátor Bruker MATRIX-MG5, jehož technické parametry jsou zobrazeny v Tabulce 11. Tento analyzátor funguje na principu infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR), což je metoda založená na částečné absorpci infračerveného světla pronikajícího vzorkem. V průběhu této absorpce dochází v závislosti na změnách dipólového momentu molekuly ke změnám energetických stavů molekul. Výsledné infračervené spektrum je funkční závislostí energie vyjádřené v jednotkách absorpce nebo v procentech transmitance na vlnové délce dopadajícího záření. Kvantitativní vyhodnocení emisních složek výfukových plynů bylo poté realizováno pomocí výrobcem poskytovaného softwaru Opus. Vyhodnoceny byly tyto emisní složky: oxid uhličitý (CO₂), oxid uhelnatý (CO), oxidy dusíku (NO_x). Hmotnostní koncentrace byly z objemových koncentrací vypočteny pomocí molárních hmotností jednotlivých emisních složek.

Tabulka 11 Technické parametry emisního analyzátoru [71]

Parametr	Hodnota
Spektrální rozsah [cm ⁻¹]	4800 – 750
Spektrální rozlišení [cm ⁻¹]	<1
Přesnost vlnové délky [cm ⁻¹]	> 0.05
Fotometrická přesnost [%]	> 0.1
Detektor [-]	Rtuť-kadmium-telurid chlazený kapalným dusíkem
Interferometr [-]	Rocksolid™, s permanentním zaostřováním
Vzorkování [-]	4 spektra při 4 cm ⁻¹ spektrálního rozlišení, 1 spektrum při 0,5 cm ⁻¹ spektrálního rozlišení

4.3 Postup měření

Před samotným měřením bylo nejdříve připraveno stanoviště, na kterém měření probíhalo. K traktoru Zetor Forterra 8641 byl přes zadní vývodový hřídel připojen dynamometr MAHA ZW-500, kterým byl motor traktoru zatěžován. Z důvodu usnadnění měření byla palivová nádrž odpojena a byla využita externí palivová nádrž, která byla umístěna na laboratorní váze VIBRA AJ-6200 a pomocí níž byla na základě hmotnostního úbytku paliva v nádrži stanovena spotřeba testované palivové směsi. Vzduch byl do motoru nasáván přes upravené potrubí, která zajišťovaly laminární proudění a v jehož středu byl umístěn průtokoměr Sierra FastFlo 620S pro měření průtoku vzduchu. Množství nasávaného vzduchu byl zaznamenán za účelem přepočtu výstupních hodnot analyzátorů spalin do hmotnostních jednotek. Na začátek tohoto potrubí byla napojena bezztrátová vtoková dýza, ve které byl umístěn manometr U-trubicový manometr pro měření tlaku v sání. Do výfukového potrubí byly umístěny sondy částicového analyzátoru EEPS 3090 a emisního analyzátoru MATRIX-MG5. Tyto sondy však nebyly ve výfukovém potrubí umístěny permanentně, ale pouze v čase měření množství emisí nebo pevných částic. Za účelem větší ucelenosti a objektivnosti měření byla k motoru připojena další čidla, jako například čidlo teploty motorového oleje, čidlo tlaku paliva, čidlo měření otáček motoru nebo čidlo teploty výfukových plynů. Všechna měřená data byla ukládána do počítače. Zjednodušené schéma měřicího systému je zobrazeno na Obrázku 15.



Obrázek 15 Zjednodušené schéma měřicího systému [72]

a – zařízení pro ukládání dat, *b* – dynamometr, *c* – emisní analyzátor, *d* – analyzátor pevných částic, *e* – snímač množství nasávaného vzduchu, *f* – laboratorní váha, *g* – externí palivová nádrž, *h* – motor, *i* – turbodmychadlo

Po přípravě stanoviště a všech měřicích zařízení byly v dostatečném množství namíchány jednotlivé palivové směsi tak, aby mohly být v případě potřeby během měření doplňovány do externí nádrže. Traktor a dynamometr využívaný pro měření byl zajištěn proti nechtěnému pohybu a motor traktoru byl zahřát na provozní teplotu. Během tohoto zahřívání byl důkladně propláchnut palivový systém a ověřena funkčnost jednotlivých měřicích zařízení. Zahřátí motoru a propláchnutí palivového systému probíhalo spalováním palivové směsi, která byla následně testována. Propláchnutí palivového systému se opakovalo při každé výměně palivové směsi v externí palivové nádrži. Po dosažení optimální teploty motoru a důsledném propláchnutí palivového systému bylo zahájeno první měření.

Nejprve byla pro každou testovanou palivovou směs naměřena vnější otáčková charakteristika motoru. Při měření vnější otáčkové charakteristiky byl spuštěn zadní vývodový hřídel a byla nastavena maximální dodávka paliva, která byla ponechána po celou dobu měření vnější otáčkové charakteristiky. V tuto chvíli připojený dynamometr zatím nevyvozoval žádný brzdný moment, motor byl tedy nezatížen a jeho otáčky byly na maximální úrovni. Po zahájení měřicího cyklu docházelo k postupnému zvyšování brzdného momentu dynamometru, díky čemuž otáčky motoru začaly klesat. V pravidelných intervalech byly snímány veličiny (otáčky vývodového hřídele, točivý moment vývodového hřídele, výkon na vývodovém hřídeli) zaznamenávány. Při poklesu otáček motoru pod hranici $1100 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ došlo k ukončení měření.

Po naměření vnější otáčkové charakteristiky bylo provedeno měření za účelem zjištění velikosti a koncentrace produkovaných pevných částic, obsahu emisí ve výfukových plynech a spotřeby paliva. Toto měření probíhalo za konstantních otáček motoru, konkrétně $1950 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Při těchto otáčkách motoru dosahují otáčky vývodového hřídele hodnoty $1000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$, což je hodnota potřebná pro správnou funkci většiny přípojného zemědělského náradí. Z tohoto důvodu pracuje motor traktoru většinu času právě při těchto otáčkách motoru. Za těchto konstantních otáček byl motor zatěžován dynamometrem, nejdříve byl zatěžován na 50 %, poté na 70 % a nakonec na 100 %. Při každém z těchto zatížení motoru byly pro každou testovanou palivovou směs zaznamenávány provozní parametry, a to po dobu cca 80 sekund.

Naměřená a zaznamenaná data z obou měření byla následně vyhodnocena a staticky zpracována v programu MS Excel. Všechna tato data byla zpracována nejdříve početně a poté i graficky. U dat získaných během druhého měření (kromě měření spotřeby paliva) jsou pro jednotlivá zatížení vypočteny a graficky znázorněny průměrné hodnoty a směrodatné odchylky, které jsou v jednotlivých grafech reprezentovány pomocí chybových úseček.

Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky byly vypočteny za použití vztahů 4 a 5:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

kde: \bar{x} průměr hodnot
 σ směrodatná odchylka
 x_i jednotlivé hodnoty
 N počet hodnot.

5 Výsledky měření

V této kapitole jsou prezentované výsledky experimentálních měření popsanych v předešlé kapitole. Autor této diplomové práce však nebyl z důvodu pandemie covidu-19 a s ní spojenými problémy u těchto experimentálních měření fyzicky přítomen a pouze zde prezentuje data, která byla během těchto měření získána. Výsledky měření jsou rozděleny do jednotlivých podkapitol, které odrážejí jednotlivé dílčí cíle této práce, a jsou prezentovány pomocí grafů a tabulek. U každého z uvedených grafů, popřípadě tabulky je uveden komentář popisující rozsah a možnou příčinu změn výkonových a emisních parametrů motoru v závislosti na použité palivové směsi.

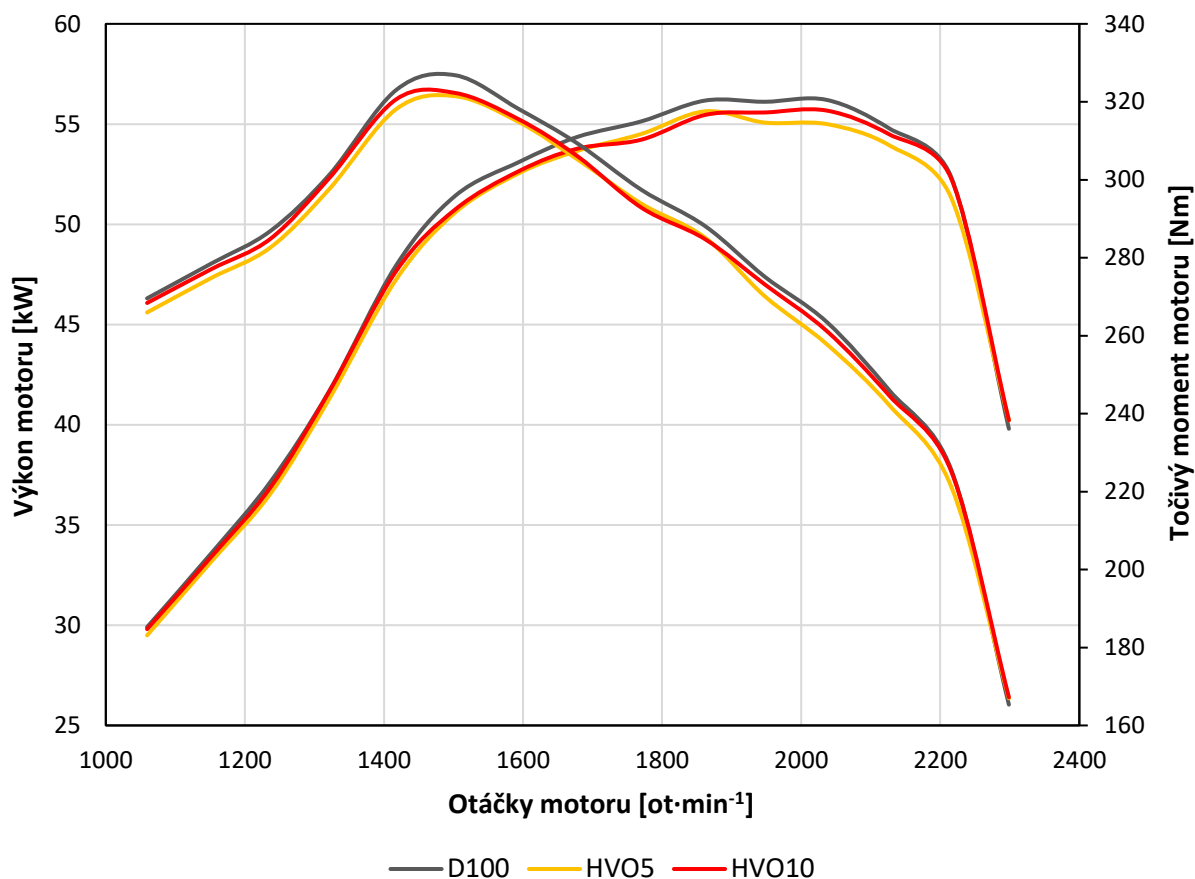
5.1 Výkonové parametry motoru

Naměřené a vypočtené hodnoty výkonu a točivého momentu jsou v grafické podobě zobrazeny v Grafu 1. V tomto grafu je zobrazena vnější otáčková charakteristika, popisující průběh točivého momentu a výkonu motoru, pro obě palivové směsi s obsahem HVO, ale také pro čistou motorovou naftu, která slouží jako referenční palivo. Výsledky měření ukázaly, že při spalování čisté motorové nafty je nejvyšší výkon motoru 56,2 kW při otáčkách 2037 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$, při spalování palivové směsi s obsahem 5 % HVO 55,6 kW při otáčkách 1863 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$ a při použití palivové směsi s obsahem HVO 10 % byl naměřen nejvyšší výkon 55,7 kW při 2035 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$. Pokles maximálního výkonu a točivého momentu je tedy u paliva HVO5 oproti D100 1,0 %, respektive 1,7 % a u paliva HVO10 1,1 %, respektive 1,5 %. Pro přehlednější jsou tyto hodnoty zobrazeny v Tabulce 12.

Průměrná změna výkonu i točivého momentu byla u paliva HVO5 v porovnání s palivem D100 -1,3 %. U paliva HVO10 byl tento průměrný rozdíl výkonových parametrů - 0,7 %. Maximální pokles výkonu i točivého momentu motoru u paliva HVO5 byl poté naměřen při 2037 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$ a činil 2,1 %, respektive 2,2 %. V případě paliva HVO10 byl zaznamenán při 1768 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$ a činil 1,7 respektive 1,5 %.

Z výše uvedeného je patrné, že průběhy točivého momentu a výkonu motoru se při použití palivových směsí s obsahem HVO mezi sebou výrazněji neliší. Největší rozdíl je možné pozorovat zhruba od 1900 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$ do 2200 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$. Při porovnání s čistou motorovou naftou došlo již k významnější změně. Křivka výkonu a točivého momentu se nejvíce oddaluje od křivek výkonu a točivého momentu paliv HVO5 a HVO10 mezi cca 1400 až 2200 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$, tento rozdíl však stále není nikterak veliký. Na pokles výkonu a točivého momentu při použití směsí s obsahem HVO oproti čisté motorové naftě má pravděpodobně vliv nižší hustota HVO,

díky které je do spalovacího prostoru vstříkováno méně paliva. To je do jisté míry kompenzováno vyšší výhřevností HVO, díky čemuž není tento pokles tak výrazný. Přímá závislost poklesu výkonu a točivého momentu motoru na koncentraci HVO v palivu zde prokázána nebyla. Vzhledem k relativně malým změnám výkonových parametrů, relativně malým koncentracím HVO v palivových směsích, odchylce měření výkonových parametrů a přesnosti brzdy nelze však dělat jednoznačné závěry.



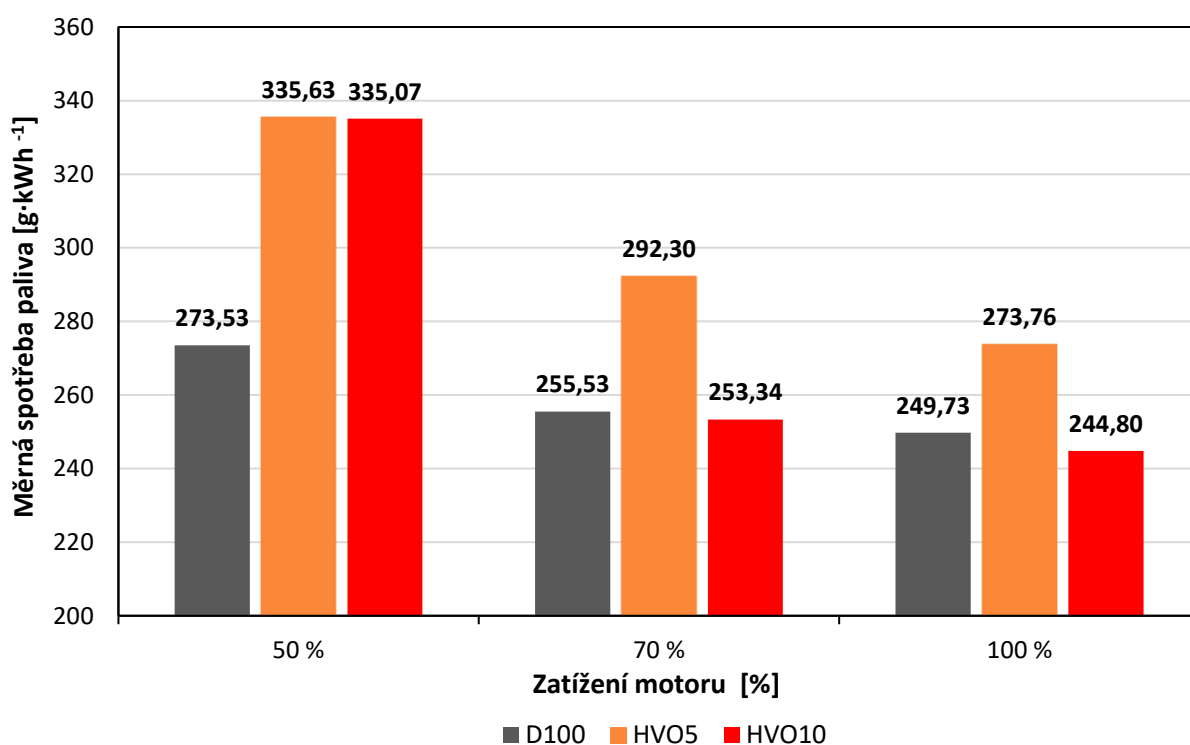
Graf 1 Vnější otáčková charakteristika motoru pro testovaná paliva

Tabulka 12 Porovnání maximálních výkonových parametrů v závislosti na použitém palivu

Palivo	Max. výkon motoru [kW]	ΔP_{max} [%]	Otáčky motoru [ot·min ⁻¹]	Max. točivý moment motoru [Nm]	ΔM_{max} [%]	Otáčky motoru [ot·min ⁻¹]
D100	56,2	-	2037	326,8	-	1503
HVO5	55,6	-1,0 %	1863	321,5	-1,7 %	1503
HVO10	55,7	-1,1 %	2035	322,3	-1,5 %	1504

5.2 Spotřeba paliva

Přehled měrné spotřeby testovaných paliv při daných zatíženích motoru lze vidět na Grafu 2. Společně s narůstajícím zatížením motoru lze pozorovat klesající trend měrné spotřeby paliva. V porovnání s čistou motorovou naftou došlo při spalování palivových směsí s obsahem HVO k nárůstu měrné spotřeby paliva. Nejvyšší měrnou spotřebu vykazovala palivová směs HVO5, kde průměrný nárůst měrné spotřeby paliva činil 15,6 %, v případě paliva HVO10 došlo k průměrnému nárůstu o 6,6 %. Jednotlivé relativní změny měrné spotřeby palivových směsí oproti referenčnímu palivu D100 v závislosti na zatížení motoru jsou uvedeny v Tabulce 13. K nejvyššímu navýšení měrné spotřeby došlo u obou paliv při 50 % zatížení. Při vyšších zatíženích již tento nárůst nebyl tak výrazný. V případě palivové směsi HVO10 došlo u vyšších zatíženích motoru dokonce ke snížení měrné spotřeby paliva oproti D100.



Graf 2 Měrná spotřeba paliva v závislosti na použitém palivu pro jednotlivá zatížení motoru

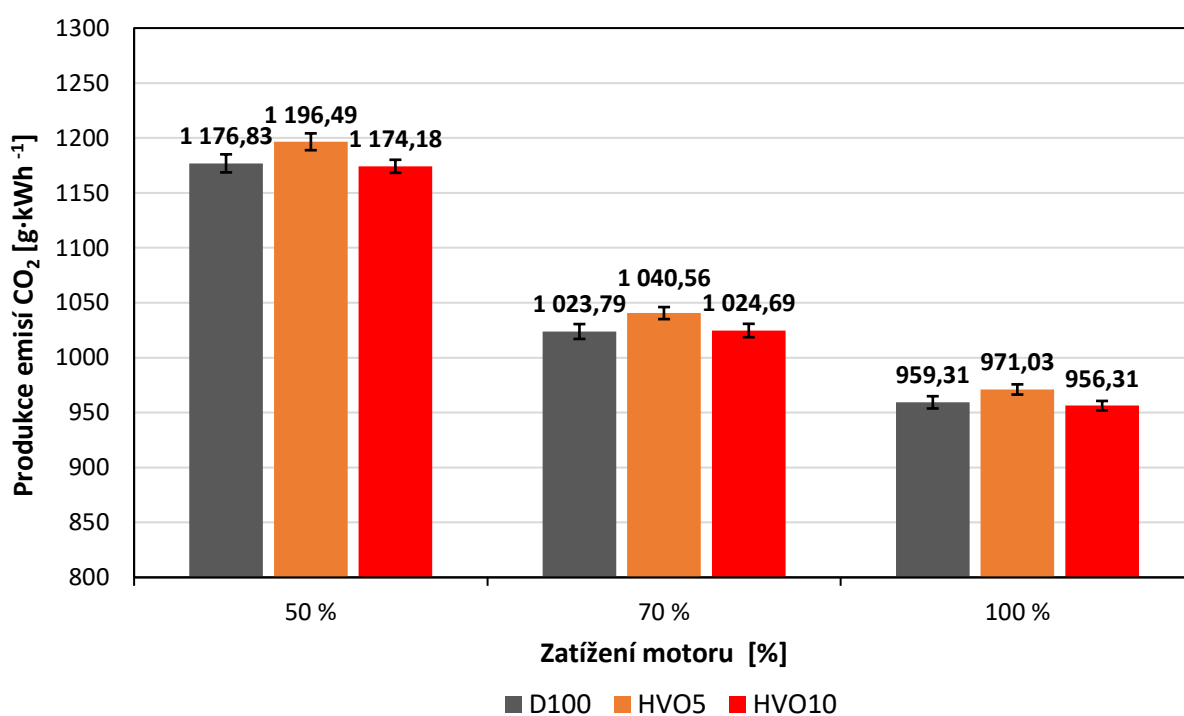
Tabulka 13 Relativní změna měrné spotřeby paliva oproti referenčnímu palivu D100

Zatížení motoru	Δm_{pe}	
	HVO5	HVO10
50 %	22,7 %	22,5 %
70 %	14,4 %	-0,9 %
100 %	9,6 %	-2,0 %

Na základě těchto výsledků lze tedy konstatovat, že obsah HVO v palivové směsi má negativní účinek na měrnou spotřebu paliva při 50 % zatížení motoru. Při zvyšování zatížení motoru dochází ke zmírnění tohoto negativního účinku, nebo dokonce ke zlepšení měrné spotřeby paliva. Nelze zde pozorovat přímou závislost zvyšující se měrné spotřeby paliva na koncentraci HVO v palivové směsi. Vliv na tento výsledek má nižší dosažený výkon pro palivové směsi s obsahem HVO, nižší hustota HVO oproti motorové naftě a vyšší výhřevnost HVO vůči motorové naftě.

5.3 Emise oxidu uhličitého (CO₂)

Na Grafu 3 je zobrazena závislost produkce emisí oxidu uhličitého na zatížení motoru a na použité palivové směsi. U všech testovaných paliv si zde lze všimnout klesajícího trendu produkce CO₂ s narůstajícím zatížením. U palivové směsi HVO5 došlo oproti referenčnímu palivu D100 k nárůstu emisí CO₂ ve všech případech. Průměrný nárůst produkce CO₂ u této palivové směsi oproti D100 je poté 1,5 %. U paliva HVO10 došlo ke zvýšení produkce CO₂ oproti referenčnímu palivu D100 pouze při 70 % zatížení motoru. U zbylých zatížení motoru došlo naopak k snížení produkce CO₂. Tyto změny jsou však velmi malé. Ve srovnání s referenčním palivem D100 byla průměrná změna produkce emisí CO₂ -0,1 %. Jednotlivé relativní změny produkce CO₂ oproti referenčnímu palivu jsou pro obě palivové směsi s obsahem HVO zobrazeny v Tabulce 14.



Graf 3 Produkce emisí CO₂ v závislosti na použitém palivu pro jednotlivá zatížení motoru

Z výše uvedeného lze říci, že 5 % přídavek HVO do motorové nafty měl negativní vliv na množství produkce emisí CO₂. V případě 10 % přídavku HVO do motorové nafty došlo pouze k velmi malým změnám oproti čisté motorové naftě. Vzhledem k velikosti těchto změn, velikosti směrodatné odchylky a přesnosti emisního analyzátoru nelze jednoznačně určit vliv použití této palivové směsi na produkci emisí CO₂. Na tyto změny v produkci CO₂ měl pravděpodobně vliv odlišný podíl uhlíku v daných palivech. Oxid uhličitý je také jeden z produktů dokonalého spalování, díky vyššímu cetanovému číslu HVO oproti čisté motorové naftě mohlo docházet k lepšímu odhořívání vstříknutého paliva a tím ke zlepšení oxidace CO na CO₂.

Tabulka 14 Relativní změna produkce emisí CO₂ oproti referenčnímu palivu D100

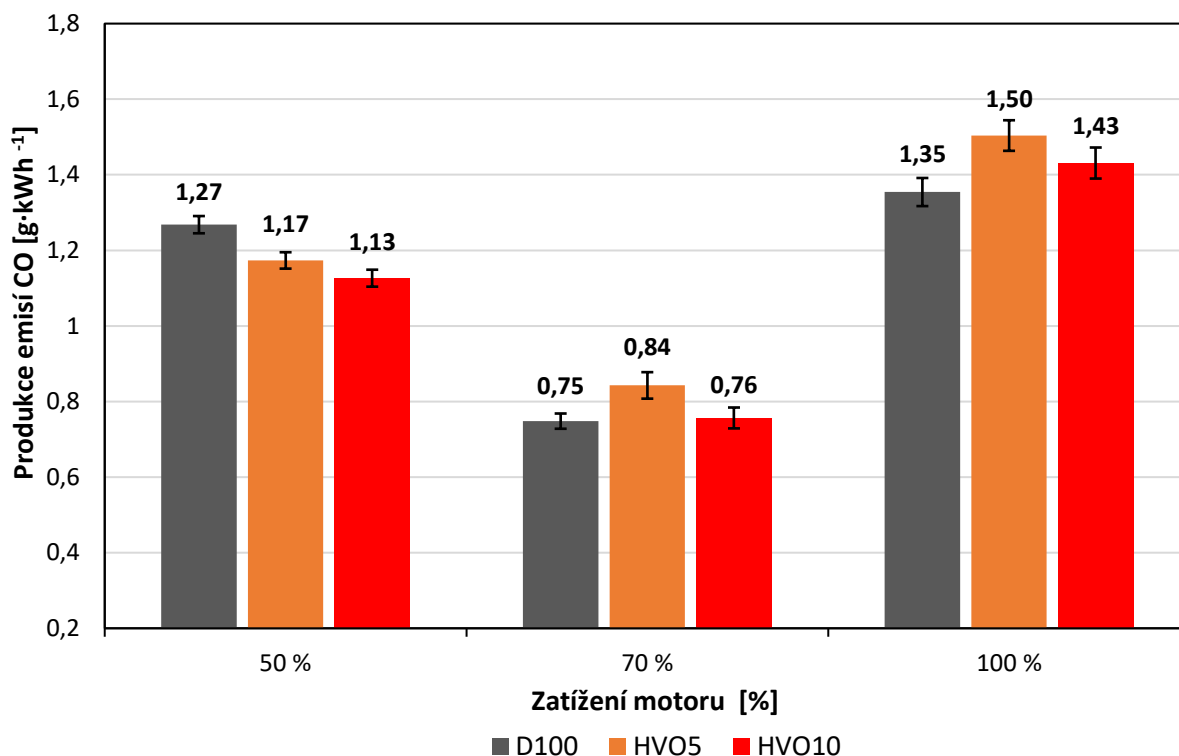
Zatížení motoru	Δ CO ₂	
	HVO5	HVO10
50 %	1,7 %	-0,2 %
70 %	1,6 %	0,1 %
100 %	1,2 %	-0,3 %

5.4 Emise oxidu uhelnatého (CO)

Z Grafu 4, který zobrazuje závislost produkce emisí oxidu uhelnatého na zatížení motoru a použité palivové směsi, lze vyzorovat, že k nejnižší produkci CO došlo při 70 % zatížení motoru, naopak při 100% zatížení motoru byla produkce CO nejvyšší. U obou palivových směsí s obsahem HVO došlo při 50% zatížení motoru ke snížení produkce CO oproti referenčnímu palivu D100. Při zatížení motoru 70 % a 100 % tyto palivové směsi naopak vykazovaly zvýšenou produkci CO. Jednotlivé relativní změny produkce CO jsou uvedeny v Tabulce 15. Průměrná změna produkce CO u paliv HVO5 a HVO10 byla 5,4 %, respektive -1,5 %.

Výsledky ukazují, že přídavky HVO do motorové nafty měly pozitivní vliv na produkci emisí CO při 50% zatížení motoru a negativní vliv při zatíženích vyšších. Na tyto výsledky měla s největší pravděpodobností vliv vyšší kinematičká viskozita HVO. S rostoucí hodnotou kinematičké viskozity totiž dochází k poklesu kvality rozprášení paliva, což má za následek zhoršení spalování a v konečném důsledku vyšší tvorbu CO a HC, jakožto produktů nedokonalého spalování. Dalšími faktorem, který mohl ovlivnit množství produkce CO, je stejně jako v případě CO₂ množství uhlíku obsaženého v HVO. Určitou roli zde mohla sehrát

také teplota spalování a nedostatek kyslíku. K nedostatku kyslíku však dochází zejména u zážehových motorů, vznětové motory pracují za normálních podmínek s přebytkem vzduchu.



Graf 4 Produkce emisí CO v závislosti na použitém palivu pro jednotlivá zatížení motoru

Tabulka 15 Relativní změna produkce emisí CO oproti referenčnímu palivu D100

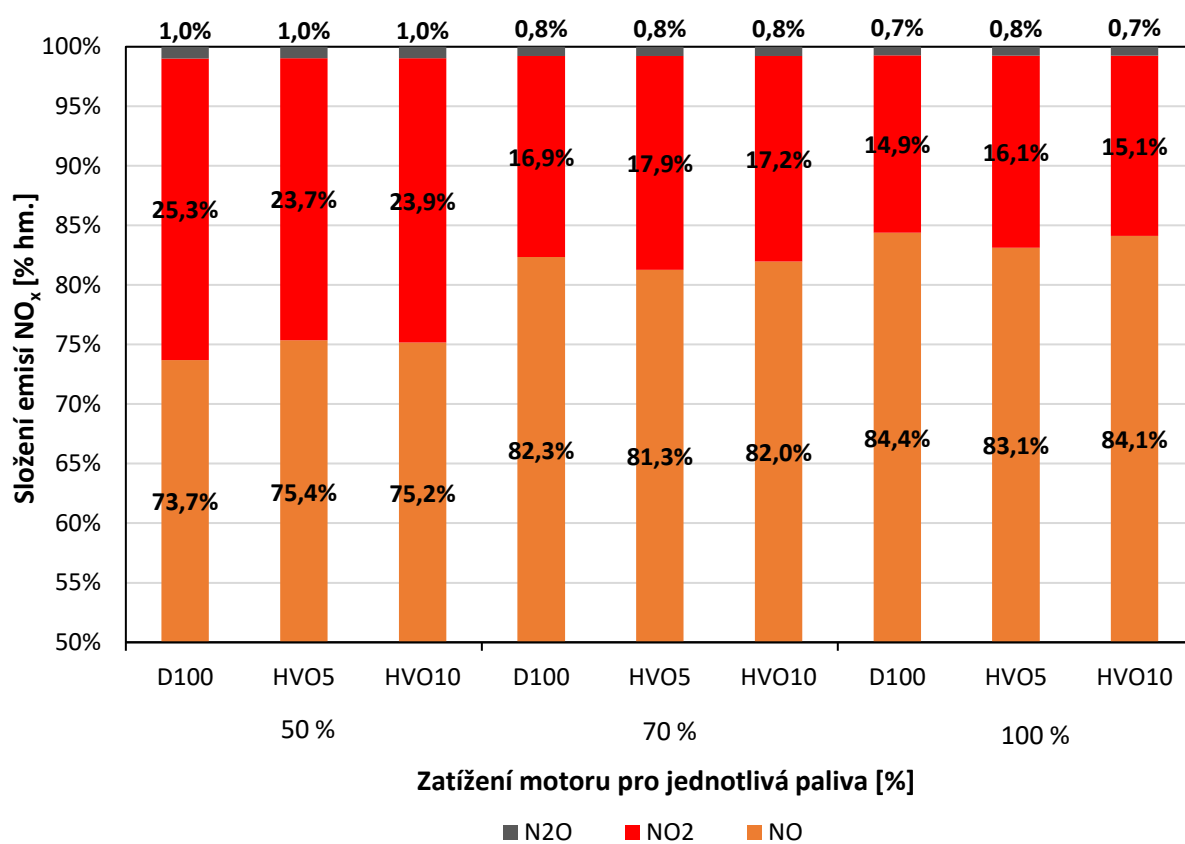
Zatížení motoru	Δ CO	
	HVO5	HVO10
50 %	-7,5 %	-11,2 %
70 %	12,6 %	1,1 %
100 %	11,0 %	5,7 %

5.5 Emise oxidů dusíku (NO_x)

Pro skupinu oxidů dusíku, které vznikají při oxidaci atmosférického dusíku během spalovacího procesu u spalovacích motorů, se používá souhrnné označení NO_x. Tuto skupinu tvoří oxid dusnatý, oxid dusičitý a oxid dusný. Jednotlivé procentuální hmotnostní zastoupení těchto látek ve skupině oxidů dusíku je v závislosti na použité palivové směsi a zatížení motoru znázorněno na Grafu 5.

Z Grafu 5 je patrné, že nejvýraznější podíl ve skupině oxidů dusíku zastupuje oxid dusnatý, jehož procentuální hmotnostní zastoupení se v závislosti na použité palivové směsi

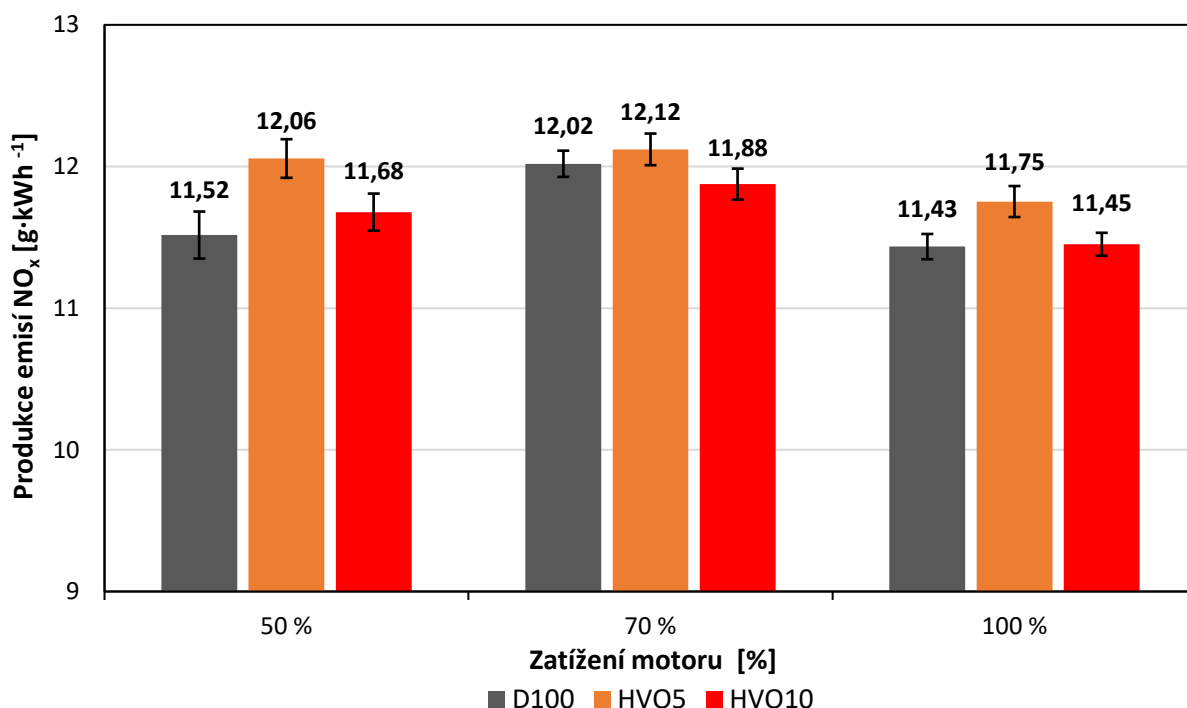
a zatížení motoru pohybuje v rozmezí od 73,7 % do 84,4 % hm. Druhou nejvíce zastoupenou látkou je oxid dusičitý, jenž se zde vyskytuje v rozmezí od 14,9 % do 25,3 % hm. Zbylou část podílu na tvorbě oxidů dusíku tvoří oxid dusný, jehož zastoupení je však v porovnání s dříve zmíněnými oxidy dusíku velmi malé (0,7–1,0 % hm.). Lze si zde všimnout trendu zvyšujícího se podílu NO a naopak snižujícího se podílu NO₂ a N₂O na celkové produkci emisí NO_x společně se zvyšujícím se zatížením motoru. Z Grafu 5 je také vidět, že podíl zastoupení jednotlivých oxidů dusíku při daných zatíženích v závislosti na použité palivové směsi se příliš nemění. Na základě těchto výsledků lze tedy říci, že přidání HVO do motorové nafty nemá zásadní vliv na poměr produkovaných oxidů dusíku.



Graf 5 Zastoupení NO, NO₂ a N₂O ve složení produkovaných emisí NO_x

Graf 6 uvádí celkové množství emisí oxidů dusíku v závislosti na použité palivové směsi a zatížení motoru. Lze zde pozorovat relativně stabilní celkové množství produkce emisí NO_x, které se se zvyšujícím zatížením motoru výrazněji nemění. V případě použití paliva HVO5 došlo ke zvýšení produkce NO_x oproti referenčnímu palivu D100 ve všech případech. Při použití paliva HVO10 poté došlo ke zvýšení produkce NO_x při zatížení motoru 50 % a 100 %, při 70 % zatížení motoru došlo naopak ke snížení produkce. Průměrný nárůst produkce NO_x oproti referenčnímu palivu D100 byl u paliva HVO5 2,8 % a u paliva HVO10 0,1 %.

Největší relativní změna u obou palivových směsí s obsahem HVO nastala při 50 % zatížení motoru. Velikosti jednotlivých relativních změn v produkci NO_x jsou uvedeny v Tabulce 16.



Graf 6 Produkce emisí NO_x v závislosti na použitém palivu pro jednotlivá zatížení motoru

Tabulka 16 Relativní změna produkce emisí NO_x oproti referenčnímu palivu D100

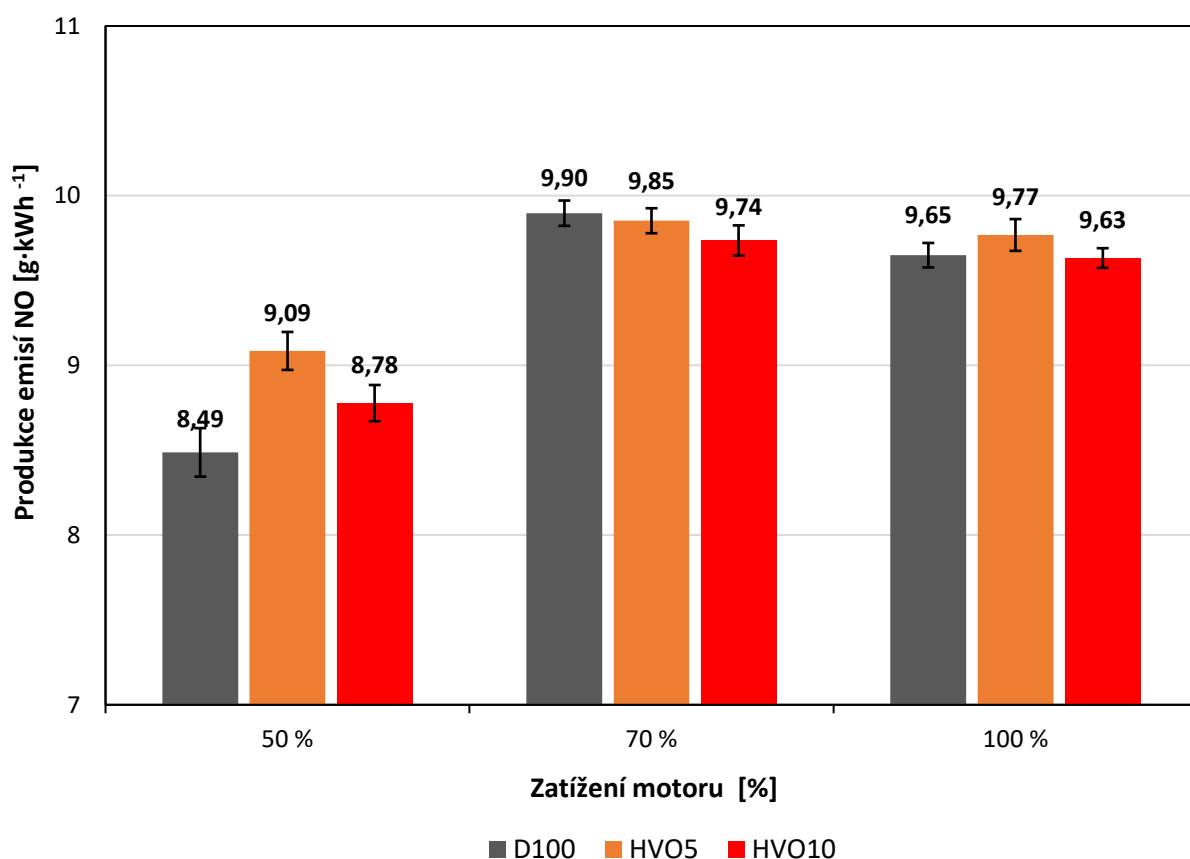
Zatížení motoru	Δ NO _x	
	HVO5	HVO10
50 %	4,7 %	1,4 %
70 %	0,8 %	-1,2 %
100 %	2,8 %	0,1 %

Tato data tedy nasvědčují tomu, že HVO negativně ovlivňuje produkci emisí NO_x, a to zejména při nižším zatížení motoru a 5 % obsahu HVO v palivu. Při vyšších zatíženích motoru tento vliv již nebyl tak významný a v případě paliva HVO10 při 70 % zatížení motoru došlo dokonce ke snížení produkce emisí NO_x. Tento výsledek tedy nelze zcela jasně interpretovat. Změny v produkci oxidů dusíku mohla ovlivnit odlišná teplota spalování nebo vliv odlišného cetanového čísla HVO na dobu, při které dochází k oxidaci dusíku v průběhu spalování.

5.5.1 Emise oxidu dusnatého (NO)

Výsledky měření produkce emisí oxidu dusnatého, zobrazené na Grafu 5, ukazují, že k nejmenší produkci NO u všech palivových směsí došlo při 50 % zatížení. Největší produkce

NO byla zaznamenána při 70 % zatížení motoru. Při plném zatížení motoru oproti 70 % zatížení motoru došlo naopak k poklesu produkce NO. Ve srovnání se zvýšením produkce NO mezi 50 % a 70 % zatížením motoru tato změna již ale není tak významná. Průměrná změna produkce emisí NO je v případě paliva HVO5 2,6 % a v případě paliva HVO10 0,5 %. Jednotlivé relativní změny produkce NO jsou poté zobrazeny v Tabulce 16. Lze si zde všimnout, že k výraznějším změnám zde došlo pouze při 50 % zatížení motoru. Při vyšších zatíženích motoru byly relativně malé.



Graf 7 Produkce emisí NO v závislosti na použitém palivu pro jednotlivá zatížení motoru

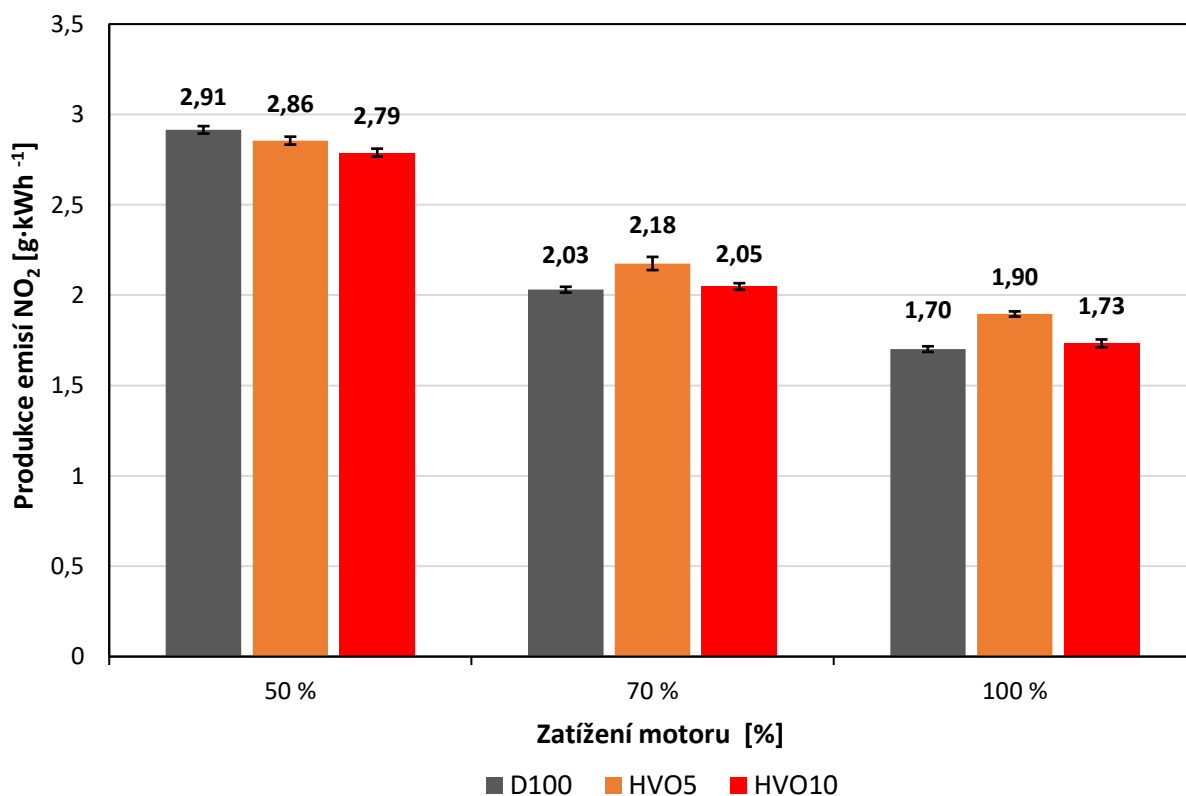
Tabulka 17 Relativní změna produkce emisí NO oproti referenčnímu palivu D100

Zatížení motoru	Δ NO	
	HVO5	HVO10
50 %	7,0 %	3,4 %
70 %	-0,5 %	-1,6 %
100 %	1,2 %	-0,2 %

Data získaná z měření tedy nasvědčují tomu, že obsah HVO v palivové směsi ovlivňuje produkci emisí NO zejména při nižším zatížení motoru, a to negativním způsobem. U vyšších zatíženích motoru nelze vzhledem k velikosti relativních změn v produkci NO a nejednoznačnosti výsledků dělat jasné závěry. Trend rostoucí produkce NO se zvyšujícím se zatížením motoru je ovlivněn měnícím se poměrem jednotlivých oxidů dusíku ve výfukových plynech v závislosti na zatížení motoru.

5.5.2 Emise oxidu dusičitého (NO₂)

Hodnoty získané během měření produkce emisí oxidu dusičitého jsou znázorněny v Grafu 8. Lze zde pozorovat trend snižující se produkce emisí NO₂ se zvyšujícím se zatížením motoru. U obou palivových směsí s obsahem HVO došlo ke snížení produkce NO₂ oproti referenčnímu palivu D100 při 50 % zatížení motoru, při zatížení motoru 70 % a 100 % naopak nastal nárůst produkce NO₂. Průměrná změna produkce NO₂ poté činila 5,5 % u paliva HVO5 a -0,5 % u paliva HVO10. K větším změnám v produkci NO₂ docházelo tedy u paliva HVO5. Největší relativní změna oproti referenčnímu palivu nastala v případě paliva HVO5 u plného zatížení motoru a v případě paliva HVO10 při 50 % zatížení motoru. Zbytek relativních změn ve srovnání s referenčním palivem D100 je uveden v Tabulce 18.



Graf 8 Produkce emisí NO₂ v závislosti na použitém palivu pro jednotlivá zatížení motoru

Tabulka 18 Relativní změna produkce emisí NO₂ oproti referenčnímu palivu D100

Zatížení motoru	Δ NO ₂	
	HVO5	HVO10
50 %	-2,1 %	-4,3 %
70 %	7,1 %	0,9 %
100 %	11,4 %	1,9 %

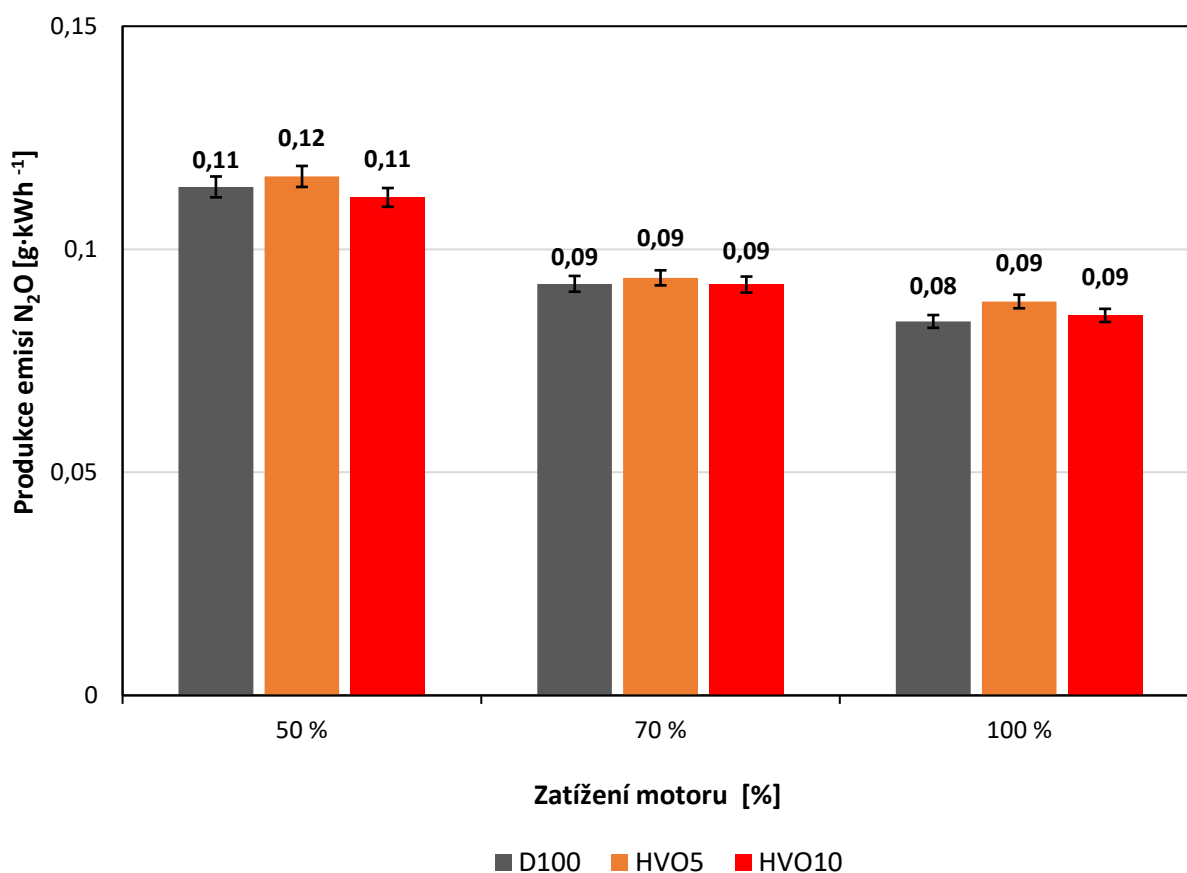
Výsledky tedy ukazují na pozitivní vliv obsahu HVO v palivu při 50 % zatížení motoru. Při 70 % a 100 % má přídavek HVO naopak vliv negativní, a to zejména u palivové směsi HVO5. Trend snižující se produkce emisí NO₂ se zvyšujícím se zatížením motoru je stejně jako v případě NO ovlivněn měnícím se poměrem složení emisí oxidů dusíku v závislosti na zatížení motoru.

5.5.3 Emise oxidu dusného (N₂O)

Produkce emisí oxidu dusného, jež je nejméně zastoupenou sledovanou látkou z oxidů dusíku ve výfukových plynech, lze vidět na Grafu 9. Obdobně jako u oxidu dusičitého došlo ke snížení produkce N₂O s narůstajícím zatížením motoru u obou testovaných palivových směsí s obsahem HVO. U paliva HVO5 došlo ke zvýšení produkce N₂O ve všech případech. Průměrný nárůst produkce N₂O zde činil 2,9 %, přičemž největší relativní změna oproti referenčnímu palivu D100 byla 5,3 %. U paliva HVO 10 došlo k navýšení produkce emisí N₂O pouze u plného zatížení motoru, u zbylých zatížení motoru došlo naopak k poklesu těchto emisí. Průměrná změna v produkci N₂O oproti referenčnímu palivu D100 je rovna -0,2 %. Přehled všech jednotlivých relativních změn v produkci N₂O v závislosti na zatížení motoru je poté uveden v Tabulce 19.

Tabulka 19 Relativní změna produkce emisí N₂O oproti referenčnímu palivu D100

Zatížení motoru	Δ N ₂ O	
	HVO5	HVO10
50 %	2,1 %	-2,1 %
70 %	1,5 %	-0,2 %
100 %	5,3 %	1,6 %

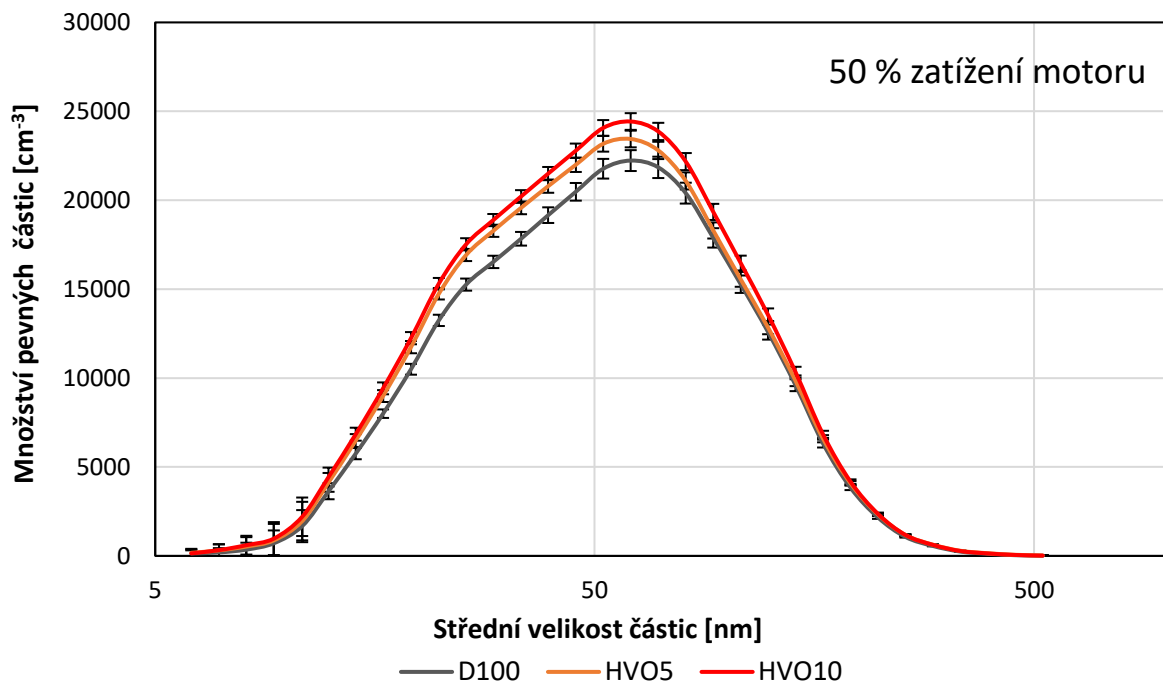


Graf 9 Produkce emisí N_2O v závislosti na použitém palivu pro jednotlivá zatížení motoru

Z výše uvedeného lze konstatovat, že HVO mělo jako přídavek v motorové naftě pozitivní vliv na produkci emisí N_2O pouze v případě jeho 5 % koncentrace. V případě 10 % přídavku HVO došlo v průměru naopak k navýšení produkce N_2O . Trend snižování těchto emisí se zvyšujícím se zatížením motoru lze podobně jako u NO a NO_2 vysvětlit měnícím se procentuálním zastoupením oxidů dusíku ve výfukových plynech v závislosti na zatížení motoru.

5.6 Pevné částice

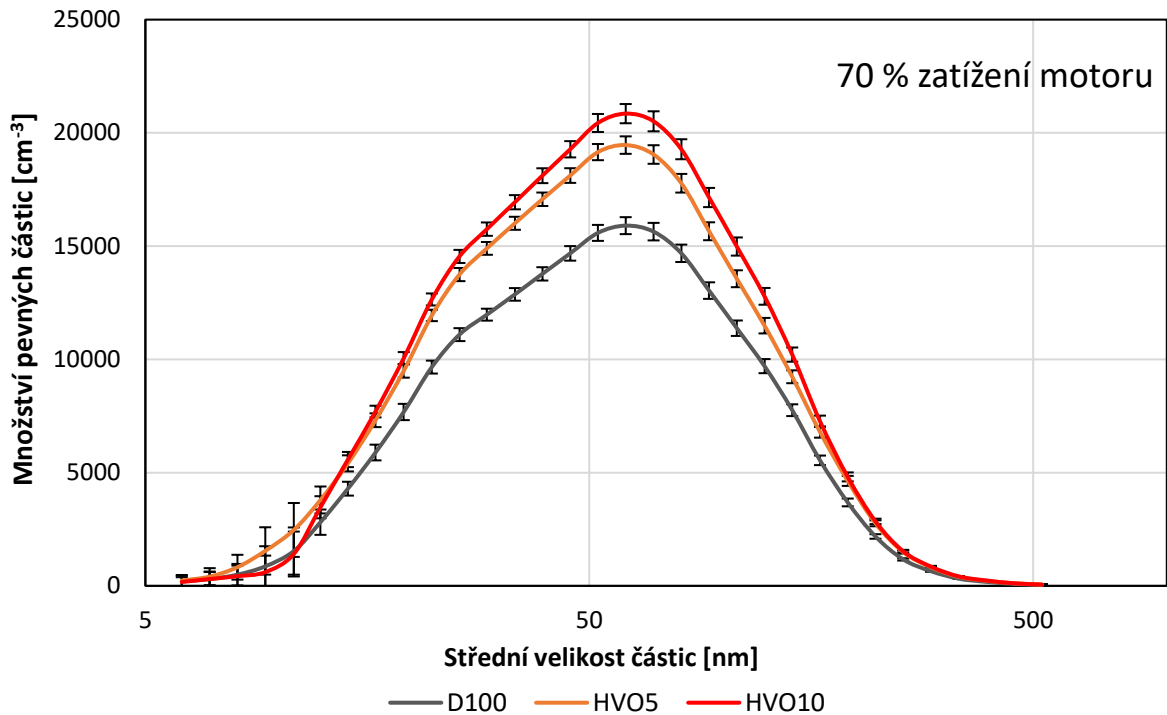
Graf 10 zobrazuje množství produkovaných pevných částic v závislosti na jejich střední velikosti a použité palivové směsi při 50 % zatížení motoru. Z grafu je evidentní, že množství pevných částic produkovaných při spalování obou paliv s obsahem HVO bylo větší než v případě referenčního paliva D100, a to v celém spektru středních velikostí těchto částic. Maximální koncentrace pevných částic ve výfukových plynech vzrostla v případě paliva HVO5 o 5,5 % a v případě paliva HVO o 9,9 %. U všech testovaných paliv se v největším počtu vyskytovaly částice o střední velikosti 60,4 nm.



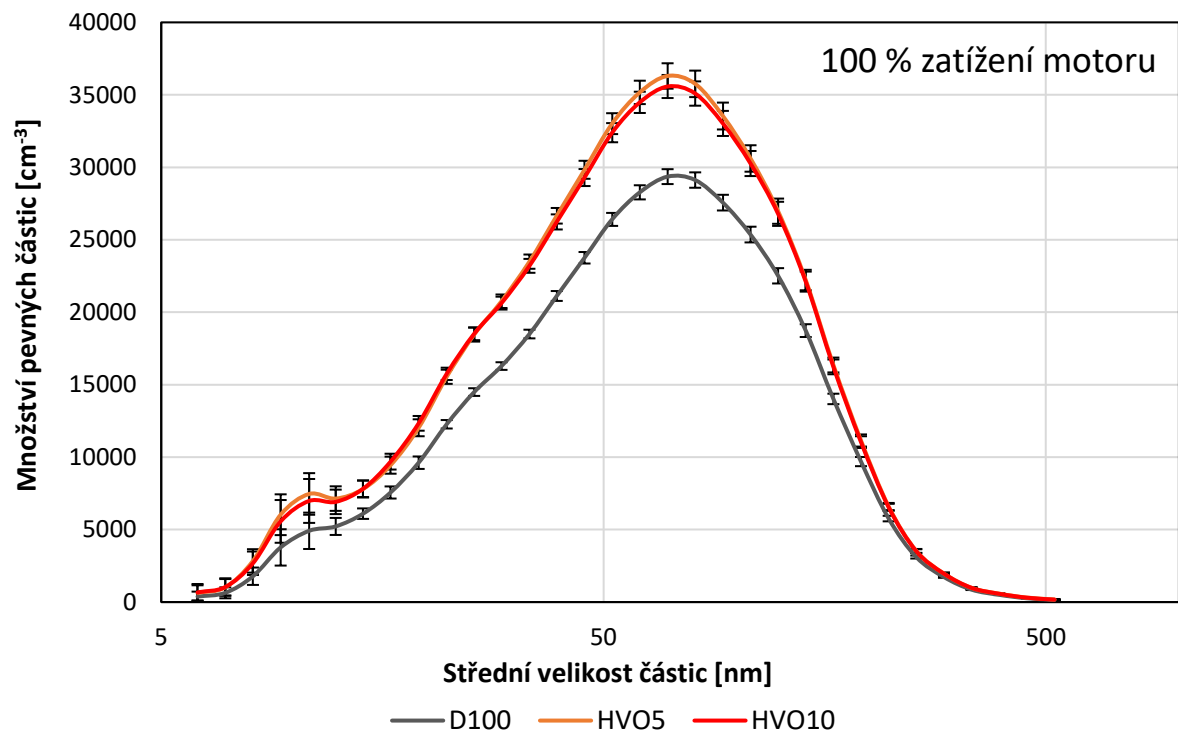
Graf 10 Množství pevných částic v závislosti na střední velikosti částic při 50 % zatížení motoru

Na Grafu 11 je možné vidět množství produkovaných pevných částic v závislosti na jejich střední velikosti a použité palivové směsi při 70 % zatížení motoru. Obdobně jako u 50 % zatížení motoru byla maximální koncentrace částic větší u palivových směsí s obsahem HVO v porovnání s referenčním palivem D100. Největší navýšení v produkci pevných částic lze pozorovat u paliva HVO10, kde jejich maximální koncentrace oproti palivu D100 vzrostla o 31,1 %. V případě paliva HVO byl tento nárůst 22,4 %. Palivo HVO10 vykazuje nejvyšší množství pevných částic téměř u všech středních velikostí částic, pouze u velmi malých částic se jeví jako nejhorší palivo HVO5, palivo HVO10 se zde jeví naopak nejlépe. Stejně jako u 50 % zatížení motoru se u všech testovaných paliv nejčastěji vyskytovaly částice o střední velikosti 60,4 nm.

Množství pevných částic ve výfukových plynech v závislosti na jejich střední velikosti a použité palivové směsi při plném zatížení motoru je zobrazeno na Grafu 12. Stejně jako u předchozích zatížení motoru došlo ve srovnání s referenčním palivem k vyšší produkci pevných částic u palivových směsí s obsahem HVO, a to v celém rozmezí středních velikostí částic obdobně jako u 50 % zatížení motoru. Na rozdíl od 50 % a 70 % byl však maximální rozdíl v koncentraci pevných částic oproti palivu D100 zaznamenán u palivové směsi HVO5, nikoli HVO10. Tento rozdíl činí 23,7 % v případě paliva HVO5 a v případě paliva HVO10 21,2 %. Je zde tedy vidět, že rozdíl v produkci pevných částic mezi palivovými směsí s obsahem HVO není tak výrazný jako v předchozích případech. Nejčastěji vyskytovaná střední velikost pevných částic je 69,8 nm.



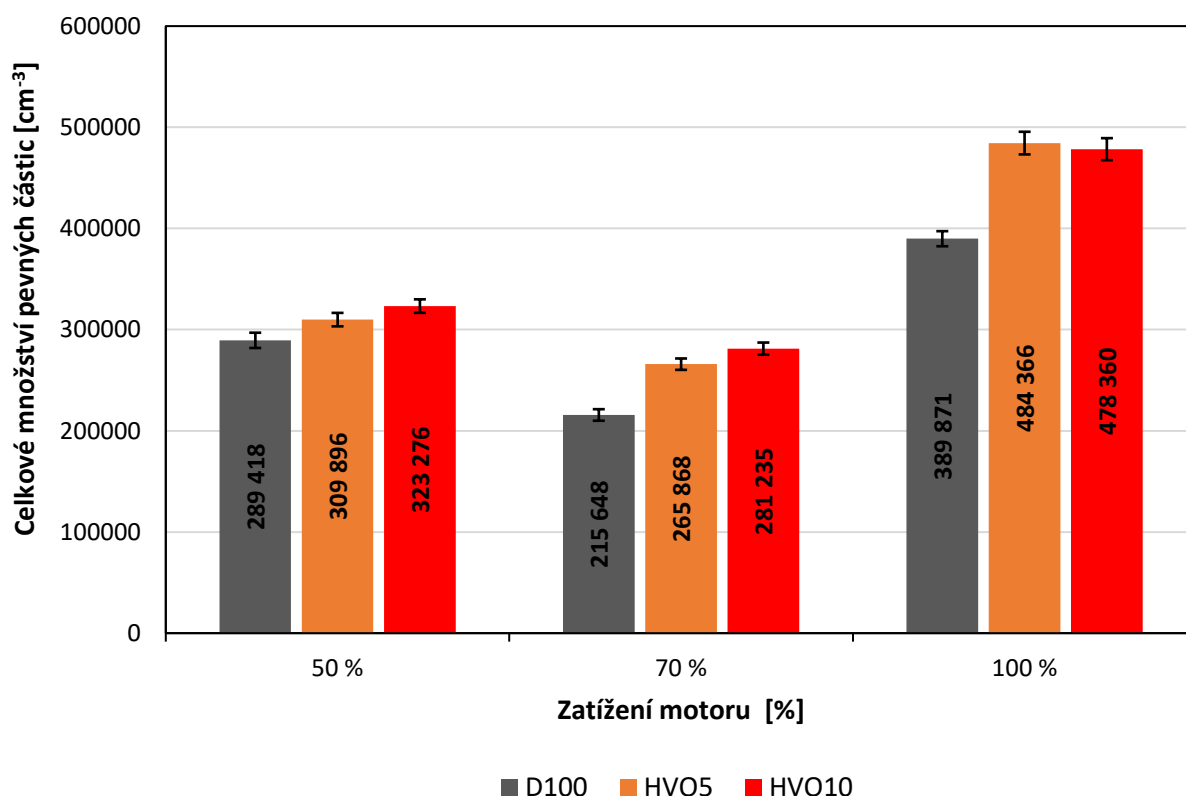
Graf 11 Množství pevných částic v závislosti na střední velikosti částic při 70 % zatížení motoru



Graf 12 Množství pevných částic v závislosti na střední velikosti částic při 100 % zatížení motoru

Graf 13 zobrazuje celkovou koncentraci pevných částic ve výfukových plynech pro všechna zatížení motoru a pro všechny testované palivové směsi. K nejvyšší produkci pevných částic došlo při plném zatížení motoru, naopak nejmenší produkce nastala při 70 % zatížení motoru. U obou palivových směsí s obsahem HVO došlo ve všech případech k navýšení

produkce pevných částic na 1 cm³. Toto navýšení bylo významné zejména při 70 % a 100 % zatížení motoru. Průměrné navýšení produkce pevných částic oproti referenčnímu palivu D100 je v případě paliva HVO5 18,2 % a v případě paliva HVO10 21,6 %. Největší procentuální změna v produkci pevných částic oproti referenčnímu palivu D100 nastala u paliv HVO5 a HVO10 při 100 % zatížení motoru, respektive 70 % zatížení motoru a činila 24,2 %, respektive 30,4 %. Jednotlivé relativní změny oproti referenčnímu palivu D100 jsou poté zobrazeny v Tabulce 20.



Graf 13 Celkové množství pevných částic v závislosti na použitém palivu pro jednotlivá zatížení motoru

Tabulka 20 Relativní změna celkového množství pevných částic oproti referenčnímu palivu D100

Zatížení motoru	Δ PM	
	HVO5	HVO10
50 %	7,1 %	11,7 %
70 %	23,3 %	30,4 %
100 %	24,2 %	22,7 %

Z výše prezentovaných dat vyplývá, že přidání HVO do motorové nafty má negativní vliv na výskyt pevných částic ve výfukových plynech, a to při všech zatíženích motoru. Přímá závislost množství produkovaných pevných částic na koncentraci HVO v palivu zde dokázána

nebyla z důvodu naměření nejvyššího počtu pevných částic u paliva HVO5 při plném zatížení motoru. Na základě shodnosti tvarů křivek na Grafu 10, 11 a 12 lze říci, že přidáním HVO do motorové nafty bylo ovlivněno množství produkovaných pevných částic, nedošlo zde však k významnému ovlivnění střední velikosti těchto částic. Tyto změny v produkci pevných částic, jakožto produktů nedokonalého spalování, mohou být způsobeny navýšením viskozity v důsledku přidání HVO do motorové nafty. Vyšší viskozita poté zapříčiňuje horší rozptylování paliva, a tím také jeho méně dokonalé odhoření ve válci motoru. Na výsledek měření mohl mít také vliv rozdílný obsah kyslíku v testovaných palivech.

6 Závěr

Diplomová práce se zabývala vlivem HVO na výkonové parametry, produkci emisí a spotřebu paliva. V teoretické části práce byla provedena literární rešerše, na jejímž základě bylo zjištěno, že využívání biopaliv za účelem snížení emisí skleníkových plynů je aktuálním tématem. Bylo také zjištěno, že v současné době nejvyužívanějším biopalivem ve vznětových motorech jsou metylestery mastných kyselin, a to i přes řadu problémů, které jejich používání přináší. Některé z těchto problémů by mohly být vyřešeny nahrazením motorové nafty HVO namísto metylestery mastných kyselin.

K ověření vlivu HVO na výkonové parametry, produkci emisí a spotřebu paliva byla provedena experimentální měření. První měření bylo provedeno za účelem naměření vnější otáčkové charakteristiky. Druhé měření probíhalo při 50 %, 70 % a 100 % zatížení motoru dynamometrem a bylo během něho sledováno množství produkovaných emisí a spotřeba paliva. Obě tato měření proběhla ve zkušebně Katedry jakosti a spolehlivosti strojů v prostorách České zemědělské univerzity v Praze na traktoru Zetor Forterra 8641 osazeným motorem Zetor 1204, pro jehož pohon byla během experimentálních měření použita celkem tři paliva. Prvním a zároveň referenčním palivem byla čistá motorová nafta bez biosložek. Zbýlá dvě paliva byla tvořena směsí motorové nafty HVO. Tato paliva jsou označována jako HVO5 a HVO10. Poměr zastoupení HVO v těchto palivových směsích byl 5 % a 10 %, jednalo se tedy o směsi s převažujícím množstvím motorové nafty a relativně nízkým zastoupením biosložky.

V praktické části práce byla vyhodnocena data získaná z výše popsaných experimentálních měření a byly porovnány vlivy jednotlivých palivových směsí na výkon motoru, točivý moment motoru, měrnou spotřebu paliva, produkci CO₂, CO, NO_x, a PM. Bylo zjištěno, že obě palivové směsi s obsahem HVO vykazují v porovnání s referenčním palivem snížený výkon a točivý moment motoru. Největší pokles maximálního výkonu byl zaznamenán u palivové směsi HVO10. K největšímu poklesu maximálního točivého momentu došlo naopak u palivové směsi HVO5. Pokles výkonu a točivého momentu byl nejspíše ovlivněn nižší hustotou HVO, díky čemuž bylo do spalovacího motoru vstříkováno menší množství paliva. Tento pokles výkonu společně s nižší hustotou HVO byl také pravděpodobně důvodem, proč byla u palivových směsí s obsahem HVO naměřena vyšší měrná spotřeba paliva v porovnání s referenčním palivem. Nejvyšší měrnou spotřebu paliva vykazovalo palivo HVO5, kde došlo k navýšení měrné spotřeby paliva u všech zatížení motoru. U paliva HVO10 došlo k navýšení měrné spotřeby paliva pouze při 50 % zatížení motoru, při zbylých zatíženích motoru došlo naopak k mírnému poklesu měrné spotřeby paliva.

Z naměřených dat vyplývá, že 5 % obsah HVO v palivu měl negativní vliv na produkci emisí CO₂ při všech zatíženích motoru. U palivové směsi s 10 % obsahem HVO došlo ke snížení produkce CO₂ při 50 % a plném zatížení motoru, při 70 % zatížení došlo k nárůstu produkce CO₂. Z pohledu CO došlo ke snížení produkce těchto emisí u obou palivových směsí s obsahem HVO při 50 % zatížení motoru, při vyšších zatíženích motoru došlo naopak k navýšení produkce emisí CO. Na produkci emisí CO₂ a CO, jakožto produktů dokonalého, respektive nedokonalého spalování mělo pravděpodobně vliv vyšší cetanové číslo a jím ovlivněná kvalita spalování. Určitou roli zde nejspíš hrál i odlišný podíl uhlíku v daných palivech a vyšší viskozita HVO oproti motorové naftě. Z hlediska celkového množství produkovaných emisí NO_x měl obsah HVO v motorové naftě negativní vliv. Ke zvýšení produkce emisí NO_x došlo ve všech případech kromě 70 % zatížení motoru u paliva HVO10. Obsah HVO však nezpůsobil zásadní změnu v poměru jednotlivých oxidů dusíku. Na tento výsledek mohla mít vliv odlišná teplota spalování nebo odlišné cetanové číslo, které dále ovlivnilo dobu, při které dochází k oxidaci dusíku v průběhu spalování. Posledním testovaným parametrem byla produkce pevných částic. Zde také došlo k navýšení produkce oproti čisté motorové naftě, a to u obou paliv s obsahem HVO při všech zatíženích motoru. Nedošlo zde však k významnému ovlivnění střední velikosti těchto částic. Pevné částice jsou dalším z produktů nedokonalého spalování. Na jejich produkci tudíž mohl mít vliv rozdílný obsah kyslíku v testovaných palivech nebo vyšší viskozita HVO, a tím také horší rozptylování paliva a méně dokonalé odhoření paliva. Podrobnější výsledky z experimentálních měření jsou uvedeny v kapitole 5 Výsledky měření, kde jsou detailněji rozebrány a komentovány.

Na základě literární rešerše se HVO jeví jako velmi perspektivní biopalivo, které má potenciál sloužit jako částečná náhrada běžné motorové nafty, a dokonce zlepšit některé výkonové a emisní parametry vznětových motorů. Výsledky této práce toto zlepšení výkonových a emisních parametrů motoru nepotvrdily. Palivové směsi s obsahem HVO se naopak ve většině případů jeví ve srovnání s motorovou naftou jako horší. Je však nutné upozornit na skutečnost existence studií a měření, které nejsou v souladu s výsledky této práce. Jedno z těchto měření proběhlo ve Výzkumném ústavu zemědělské techniky a je podrobněji popsáno v kapitole 2.5.4.4. Během tohoto měření, na rozdíl od měření provedených v rámci této diplomové práce, došlo ke zvýšení indikovaného výkonu, snížení měrné spotřeby paliva a snížení produkce emisí CO₂, CO, NO_x, PM, a to při 30 % i 100 % obsahu HVO v palivové směsi. To ukazuje na důležitost testování pokročilých biopaliv a provádění dalších zkoušek a měření na různých konstrukcích a nastaveních motorů.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] ŠIMÁČEK, Pavel, Dan VRTIŠKA, Zlata MUŽÍKOVÁ a Milan POSPÍŠIL. Motorová paliva vyráběná hydrogenací rostlinných olejů a živočišných tuků. *Chem. Listy*. 2017, s. 206-212.
- [2] VÁCHOVÁ, Veronika a Petr VOZKA. Hydrogenace rostlinných olejů na paliva pro vznětové motory. *PALIVA* 7. 2015, 66-73.
- [3] VOBECKÁ, Kateřina. Biopaliva z vodních řas. Praha, 2012, 44 s. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze. Vedoucí práce Ing. Mgr. Jakub Kočan.
- [4] ING. JINDRA, Petr. VLIV BIOPALIV NA EMISE SPALOVACÍCH MOTORŮ. Praha, 2017, 21 s.
- [5] Biopaliva: Krátký souhrn problematiky. Česká asociace petrolejářského průmyslu a obchodu (ČAPPO). 2012. Dostupné také z: <http://www.cappo.cz/res/data/000071.pdf>
- [6] Co jsou biopaliva: Kapalná biopaliva. *Preol.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.preol.cz/info-pro-verejnost/co-jsou-biopaliva>
- [7] BRTASKÝ, D. a D. STACHO. Biopaliva pro diesellové motory: Sborník přednášek 16. ročníku konference Reotrib 2010 – Kvalita paliv a maziv. VŠCHT Praha, 2012, s. 102-108. ISBN 978-80-7080-748-4.
- [8] ŠARAL, Antonín. Hodnocení vlivu biopaliv pro dopravní prostředky na životní prostředí. Pardubice, 2017, 67 s. Bakalářská práce. UNIVERZITA PARDUBICE DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA. Vedoucí práce Ing. Marie Sejkorová, Ph.D.
- [9] HROMÁDKO, JAN, JIŘÍ HROMÁDKO, VLADIMÍR HÖNIG a MARTIN CINDR. TECHNOLOGIE VÝROBY BIOPALIV DRUHÉ GENERACE. *Chem. Listy*. Technická fakulta, Česká zemědělská univerzita v Praze, 2010, 784-790.
- [10] HROMÁDKO, JAN. Speciální spalovací motory a alternativní pohony. Grada Publishing a.s., 2012.
- [11] HEDEGAARDOV, C. Nový návrh Komise, jak minimalizovat dopad výroby biopaliv na klima. 2012.

- [12] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) 2018/2001 o podpoře a využívání energie z obnovitelných zdrojů (přepřacované znění). In: 2018. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN#d1e3368-82-1>
- [13] Legislativní rámec a praxe v oblasti biopaliv v EU a USA. In: BERMAN GROUP A RADIM ŠPAČEK CONSULTING, 2012. Dostupné také z: http://www.osel.cz/_files/6688_biopaliva%20v%20eu%20a%20usa.pdf
- [14] Biofuels: The fuel on the future. Third Generation Biofuels [online]. In: Velká Británie [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <http://biofuel.org.uk/third-generation-biofuels.html>
- [15] TRÁVNÍČEK, Petr. Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití. 1. Mendelova univerzita v Brně, 2015, 209 s. ISBN 978-80-7509-206-9.
- [16] MASOJÍDEK, J., R. LHOTKÝ a O. PRÁŠIL. Mikrořasy – solární továrna v jedné buňce: Věda kolem nás. 2016, 28.
- [17] POŘÍZEK, Vít. VYUŽITÍ PALIV Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ A ODPADŮ. Brno, 2015, 119 s. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Pavel Skryja.
- [18] MATZNER, Lukáš. Vliv biopaliv na provozní parametry spalovacích motorů. Praha, 2018, 64 s. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce Ing. Jakub Mařík, Ph.D.
- [19] BC. SVOBODA, Jan. Využití alkoholových paliv v malých dvoudobých zážehových motorech. Liberec, 2019, 100 s. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Doc. Michal Vojtíšek, Ph.D.
- [20] WALLNETR, Thomas, Andrew ICKES a Kristina LAWYER. Analytical Assessment of C2–C8 Alcohols as Spark-Ignition Engine Fuels [online]. Dostupné také z: https://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9783642337765-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1356783-p174673522
- [21] PEXA, M. a K. KUBÍN. Effect of rapeseed methyl ester on fuel consumption and engine power. Research in Agricultural Engineering. 58(2), 2012, 37-45.

- [22] HROMÁDKO, Jan, Jiří HROMÁDKO, Petr MILER, Vladimír HÖNIG a Pavel ŠTĚRBA. VYUŽITÍ BIOETHANOLU JAKO PALIVA VE SPALOVACÍCH MOTORECH. Chem. Listy 105 [online]. 122-128.
- [23] MUŽÍKOVÁ, Z., M. POSPÍŠIL a G. ŠEBOR. Využití bioethanolu jako pohonné hmoty ve formě paliva E85. Chem. Listy [online]. 677-683.
- [24] LAURIN, J. Kvasný líh v motorových palivech [online]. Dostupné také z: [http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241 BOZEK/publikace/2006/2006_103_01.pdf](http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241_BOZEK/publikace/2006/2006_103_01.pdf)
- [25] KOVÁŘ, Martin. Vozidlové motory na paliva s obsahem alkoholů. Liberec, 2013, 39 s. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce doc. Ing. Laurin Josef, CSc.
- [26] BERMAN GROUP, a RADIM ŠPAČEK CONSULTING. Legislativní rámec a praxe oblasti biopaliv v EU a USA. 2012.
- [27] SLADKÝ, V. Biobutanol – vhodnější náhrada benzínu. Biom.cz [online]. ISSN 1801-2655. Dostupné také z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biobutanol-vhodnejsi-nahrada-benzinu>
- [28] HÖNIG, Vladimír, Martin KOTEK, Matyáš ORSÁK a Jan HROMÁDKO. Využití biobutanolu v zážehových motorech. LCaŘ [online]. 2015, (9-10), 311-315.
- [29] LAURIN, Josef. Étery získávané z biomasy jako alternativní automobilová paliva [online]. Dostupné také z: <http://www.enviweb.cz/clanek/ekoauto/92143/butanol-jako-motorove-palivo2>
- [30] POSPÍŠIL, Milan, Jakub ŠÍŠKA a Gustav ŠEBOR. Biobutanol jako pohonná hmota v dopravě. Ústav technologie ropy a petrochemie VŠCHT. Praha, 2008.
- [31] NEJEZCHLEB, R. Spalování kapalných paliv z obnovitelných zdrojů. Brno, 2011, 77 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Ing. Vít Kermes, Ph.D.
- [32] SHAMSUL, N.S., S.K. KAMARUDIN, N.A. RAHMAN a N.T. KOFLI. An overview on the production of bio-methanol as potential renewable energy [online]. 2014, s. 579-585. Dostupné také z: www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114001452?via%3Dihub

- [33] SNÁŠEL, Pavel. ALTERNATIVNÍ PALIVA PRO SPALOVACÍ MOTORY PRO KOMERČNÍ AUTOMOBILY. Brno, 2008, 52 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Josef Štětina, Ph.D.
- [34] FIVGA, Antzela, Lais SPERANZA, Carolina BRANCO, Miloud OUADI a Andreas HORNUNG. A review on the current state of the art for the production of advanced liquid biofuels [online]. AIMS Energy, 2019, 46-76. Dostupné z: doi:10.3934/energy.2019.1.46
- [35] ŠEBORG, G., M. POSPÍŠIL a J. ŽÁKOVEC. Technicko – ekonomická analýza vhodných alternativních paliv v dopravě [online]. 2006.
- [36] VLK, František. Alternativní pohony motorových vozidel. Brno, 2004.
- [37] BABIDA, Miroslav, Ervin LUMNITZER, Darina BABIDOVÁ a Jana VÁRGOVÁ. Environmentalistika: Alternatívne pohony automobilov. Košice: Edice študijnej literatury. TU v Košicích, 2007, 107 s. ISBN 978-80-8073-937-9.
- [38] NANDA, Sonil, Dai-Viet VO a Prakash SARANGI. Biorefinery of Alternative Resources: Targeting Green Fuels and Platform Chemicals. Singapore: Springer, 2020. ISBN 978-981-15-1804-1. Dostupné také z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=IVHaDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA127&dq=technological+advancements+in+the+production+of+biomethanol&ots=yVZPMPmD3n&sig=NrURUdAp8L3wI9lzxXEMi-7dp_k&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [39] VERHELST, Sebastian, James WG TURNER, Louis SILEGHEM a Jeroen VANCOILLIE. Methanol as a fuel for internal combustion engines [online]. s. 45-84. Dostupné z: doi: doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.001
- [40] LAWRENCE, David. Design and development of a high pressure ED95 fuel delivery system for a single cylinder test cell engine. STOCKHOLM, SWEDEN, 2020, 26 s. DEGREE PROJECT IN VEHICLE ENGINEERING. KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY. Vedoucí práce Andreas Cronhjort.
- [41] HROMÁDKO, Jan, Jiří HROMÁDKO, Petr MILER a Pavel ŠTĚRBA. Využití paliva E95 ve vznětových motorech. LCaŘ [online]. 63-66. Dostupné také z: http://www.cukr-listy.cz/on_line/2011/PDF/63-66.pdf

- [42] LAURIN, Josef. Biobutanol – motorové palivo druhé generace. *Energie* 21 [online]. s. 46-47. ISSN 1803-0394.
- [43] KUMAR, Satish. Advances in diesel-alcohol blends and their effects on the performance and emissions of diesel engines: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2013, 22.
- [44] HÖNIG, Vladimír, Jan HROMÁDKO a Matyáš ORSÁK. VYUŽITÍ BIOBUTANOLU VE VZNĚTOVÝCH MOTORECH A JEHO VLIV NA PARAMETRY MOTOROVÉ NAFTY. *Chem. Listy* 109 [online]. 2015, 722-725.
- [45] ŠÍŘMAR, Jiří. Pracovní oběhy spalovacích motorů za použití biopaliv. Praha, 2018, 71 s. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.
- [46] YUSAF, T., I. HAMAWAND, P. BAKER a G. NAJAFI. THE EFFECT OF METHANOL-DIESEL BLENDED RATIO ON CI ENGINE PERFORMANCE [online]. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME)*, 2013, s. 1385-1395. ISSN ISSN: 2180-1606.
- [47] YUSAF, T. a G. NAJAFI. Experimental investigation of using methanol-diesel blended fuels in diesel engine [online]. 4th International Conference on Thermal Engineering Theory and Applications.
- [48] BHUIYA, M.M.K., M.G. RASUL, M.M.K. KHAN, N. ASHWATH a A.K. AZAD. Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel – Part: 1 Selection of feedstocks, oil extraction techniques and conversion technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2015.04.163
- [49] HROMÁDKO, J., V. HÖNIG, J. HROMÁDKO, P. MILER a J. KRUPÍČKA. ANALÝZA ŠKODLIVÝCH EMISÍ VZNĚTOVÉHO MOTORU PŘI PROVOZU NA ROSTLINNÝ OLEJ. [online]. Pardubice: CHEMagazín: časopis pro chemicko-technologickou a laboratorní praxi, 2010. Dostupné také z: http://www.chemagazin.cz/userdata/chemagazin_2010/file/chxx_1_cl5.pdf

- [50] DE LUNA, G. MARK DANIEL, Jodel CUASAY, Nolan TOLOSA a Tsair-Wang CHUNG. Transesterification of soybean oil using a novel heterogeneous base catalyst: Synthesis and characterization of Na-pumice catalyst, optimization of transesterification conditions, studies on reaction kinetics and catalyst reusability. *Fuel* [online]. 2007, 246-253, 209 s. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2017.07.086
- [51] PR. Budoucnost motorových paliv: Motorová nafta [online]. 2013. Dostupné také z: <https://www.petrol.cz/aktuality/budoucnost-motorovych-paliv-motorova-nafta-3033>
- [52] VÍŠEK, Luboš a Michal POKORNÝ. VÝROBA ESTERŮ MASTNÝCH KYSELIN (BIONAFTY) Z ODPADNÍCH ŽIVOČIŠNÝCH TUKŮ. *Chem. Listy* 107 [online]. 2013, 476-478.
- [53] POSPÍŠIL, Rudolf a Martin ZAPLETAL. VYUŽÍVÁ ČESKÁ REPUBLIKA BIONAFTU DRUHÉ GENERACE? *Chem. Listy* 114 [online]. 686688. Dostupné také z: <http://chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/3713/3643>
- [54] HÖNIG, V. Přednášky z předmětu Paliva a maziva. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- [55] KOVÁŘ, J. Řepkový olej, problematika jeho palivářského využití, sborník referátů z 23. vyhodnocovacího semináře „Systém výroby řepky“. Praha: SPZO s.r.o., 2006, 345 s. ISBN 80-27065-00-x.
- [56] VRTIŠKA, Dan a Pavel ŠIMÁČEK. KVALITA PALIV PRO VZNĚTOVÉ MOTORY: VLIV NA PROVOZ VOZIDEL A EMISE POLUTANTŮ, KONTROLA JAKOSTI. PALIVA 6 [online]. 90-96. Dostupné také z: http://www.petrmach.cz/wp-content/uploads/2017/08/kvalita_paliv_pro_vznetove_motory_vliv_na_provoz_vozidel_a_emise_polutantu_kontrola_jakosti-1.pdf
- [57] LORENZI, Guido, Patrícia BAPTISTA, VENEZIA, Carlos SILVA a Massimo SANTARELLI. Use of waste vegetable oil for hydrotreated vegetable oil production with high-temperature electrolysis as hydrogen source [online]. 1-12. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2020.117991
- [58] SATYARTHI, J., T. CHIRANJEEVI, D. GOKAK a P. VISWANATHAN. An overview of catalytic conversion of vegetable oils/fats into middle distillates [online]. *Catal. Sci. Technol*, 2013, 70-80. ISSN 2044-4753. Dostupné z: doi:10.1039/C2CY20415K

- [59] ŠIMÁČEK, Pavel, David KUBIČKA, Gustav ŠEBOR a Milan POSPÍŠIL. Hydroprocessed rapeseed oil as a source of hydrocarbon-based biodiesel [online]. 456-460. ISSN 0016-2361.
- [60] HANCSÓK, Jenő, Márton KRÁR, Szabolcs MAGYAR, László BODA, András HOLLÓ a Dénes KALLÓ. Investigation of the production of high cetane number bio gas oil from pre-hydrogenated vegetable oils over Pt/HZSM-22/Al₂O₃: Microporous and Mesoporous Materials [online]. 148-152.
- [61] KRAJÍČEK, Ivo. Výkonové a emisní parametry paliv s vysokým obsahem HVO. Sborník přednášek 22. ročníku konference Reotrib 2016 – Kvalita paliv a maziv. Praha: VŠCHT Praha, s. 102-108. ISBN 978-80-7080-962-4.
- [62] AKTUALIZACE IMPLEMENTAČNÍHO AKČNÍHO PLÁNU: Oblast Alternativní pohonné hmoty pro silniční dopravu. Praha: Česká asociace petrolejářského průmyslu a obchodu, 2019, 17 s. Dostupné také z: <https://www.tpsd-ertrac.cz/file/5-etapa-oblast-alternativni-pohonne-hmoty-pro-silnicni-dopravu/>
- [63] Informace k distribuci motorové nafty s 30 % HVO (Verva Diesel) - nelze uplatnit na "zelenou naftu". | ČMSZP| Českomoravský svaz zemědělských podnikatelů.
- [64] HVO součástí strategie Scanie ke snížení emisí. Scania Czech Republic s.r.o., Sobínská 186, 252 19 Chrást'any, Česká republika, 2016.
- [65] Hydrogenovaný rostlinný olej-DAF Trucks CZ. DAF Trucks CZ, s.r.o.
- [66] PRAŽAN, Radek, Zdeňka ŠEDIVÁ a Petr JEVIČ. Měření výkonových parametrů a emisí kapalných paliv s vysokým podílem biosložky. MECHANIZACE ZEMĚDĚLSTVÍ [online]. Výzkumný ústav zemědělské techniky, v.v.i., Praha, 98-101. Dostupné také z: <http://www.vuzt.cz/svt/vuzt/publ/P2017/028.pdf>
- [67] Návod k obsluze a údržbě. ZETOR 8641 Forterra Turbo [online]. 2004. Dostupné také z: http://www.cals.cz/zetorservice/files/1/Forterra_Z_8641-Z11741_CZ.pdf
- [68] Emmission Standards: USA: Nonroad Diesel Engines. DieselNet [online].
- [69] LPS ZW-500 - MAHA Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co KG. [online]. 2017. Dostupné také z: <http://www.maha.co.uk/power-take-off-dynamometer-lps-zw500.htm>

- [70] ENGINE EXHAUST PARTICLE SIZER (EEPS) 3090: PRODUCT DETAILS. Tsi.com [online]. Dostupné z: [https://tsi.com/products/particle-sizers/fast-particle-sizer-spectrometers/engine-exhaust-particle-sizer-\(eeps\)-3090/](https://tsi.com/products/particle-sizers/fast-particle-sizer-spectrometers/engine-exhaust-particle-sizer-(eeps)-3090/)
- [71] MATRIX-MG5 Gas Analyzer. Bruker.com [online]. Dostupné také z: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/infrared-and-raman/gas-analysis/matrix-mg5-gas-analyzer.html>
- [72] PEXA, Martin, Jakub ČEDÍK, Vladimír HÖNIG a Radek PRAŽAN. Lignocellulosic Biobutanol as Fuel for Diesel Engines. Bioresources.com [online]. 6006-6016. Dostupné z: http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_11_3_6006_Pexa_Lignocellulosic_Biobutanol_Fuel_Diesel

Seznam obrázků

Obrázek 1 Potenciál biopaliv I. a II. generace na snížení emisí CO ₂	6
Obrázek 2 Technologické postupy výroby biopaliv první a druhé generace	7
Obrázek 3 Schéma pěstování řas a zpracování biomasy	9
Obrázek 4 Oktanová čísla alkoholů.....	10
Obrázek 5 Schéma FFV motoru	13
Obrázek 6 Zjednodušené schéma produkce biometanolu	16
Obrázek 7 Vliv koncentrace butanolu v palivové směsi na výkon a točivý moment motoru ..	21
Obrázek 8 Princip duotermického motoru.....	22
Obrázek 9 Struktura zastoupení olejů a tuků pro výrobu bionafty v Evropě	24
Obrázek 10 Základní schéma transesterifikace	25
Obrázek 11 Blokové schéma výroby bionafty	26
Obrázek 12 Typický výtěžek oleje z jednotlivých surovin	30
Obrázek 13 Zjednodušené reakční schéma hydrogenace rostlinného oleje	32
Obrázek 14 Porovnání středního indikovaného výkonu a relativního indikovaného výkonu..	36
Obrázek 15 Zjednodušené schéma měřicího systému	43

Seznam tabulek

Tabulka 1 Množství oleje získaného z různých druhů rostlin.....	8
Tabulka 2 Základní vlastnosti alkoholových paliv a benzínu	10
Tabulka 3 Porovnání vybraných vlastností bionafty a motorové nafty.....	27
Tabulka 4 Porovnání vybraných vlastností motorové nafty, MEŘO a NExBTL.....	34
Tabulka 5 Výsledky testovaných vzorků paliv.....	37
Tabulka 6 Fyzikálně-chemické vlastnosti testovaných paliv	39
Tabulka 7 Technická specifikace motoru Zetor 1204	40
Tabulka 8 Emisní limity TIER II.....	40
Tabulka 9 Technické parametry dynamometru MAHA ZW 500.....	41
Tabulka 10 Technické parametry analyzátoru částic EEPS 3090	42
Tabulka 11 Technické parametry emisního analyzátoru	42
Tabulka 12 Porovnání maximálních výkonových parametrů v závislosti na použitém palivu	47
.....	47
Tabulka 13 Relativní změna měrné spotřeby paliva oproti referenčnímu palivu D100.....	48
Tabulka 14 Relativní změna produkce emisí CO ₂ oproti referenčnímu palivu D100.....	50

Tabulka 15 Relativní změna produkce emisí CO oproti referenčnímu palivu D100	51
Tabulka 16 Relativní změna produkce emisí NO _x oproti referenčnímu palivu D100.....	53
Tabulka 17 Relativní změna produkce emisí NO oproti referenčnímu palivu D100.....	54
Tabulka 18 Relativní změna produkce emisí NO ₂ oproti referenčnímu palivu D100.....	56
Tabulka 19 Relativní změna produkce emisí N ₂ O oproti referenčnímu palivu D100.....	56
Tabulka 20 Relativní změna celkového množství pevných částic oproti referenčnímu palivu D100	60

Seznam grafů

Graf 1 Vnější otáčková charakteristika motoru pro testovaná paliva.....	47
Graf 2 Měrná spotřeba paliva v závislosti na použitém palivu pro jednotlivá zatížení motoru	48
Graf 3 Produkce emisí CO ₂ v závislosti na použitém palivu pro jednotlivá zatížení motoru...	49
Graf 4 Produkce emisí CO v závislosti na použitém palivu pro jednotlivá zatížení motoru....	51
Graf 5 Zastoupení NO, NO ₂ a N ₂ O ve složení produkovaných emisí NO _x	52
Graf 6 Produkce emisí NO _x v závislosti na použitém palivu pro jednotlivá zatížení motoru ..	53
Graf 7 Produkce emisí NO v závislosti na použitém palivu pro jednotlivá zatížení motoru....	54
Graf 8 Produkce emisí NO ₂ v závislosti na použitém palivu pro jednotlivá zatížení motoru ..	55
Graf 9 Produkce emisí N ₂ O v závislosti na použitém palivu pro jednotlivá zatížení motoru ..	57
Graf 10 Množství pevných částic v závislosti na střední velikosti částic při 50 % zatížení motoru	58
Graf 11 Množství pevných částic v závislosti na střední velikosti částic při 70 % zatížení motoru	59
Graf 12 Množství pevných částic v závislosti na střední velikosti částic při 100 % zatížení motoru.....	59
Graf 13 Celkové množství pevných částic v závislosti na použitém palivu pro jednotlivá zatížení motoru	60