

# Spalování směsi etanolu s rostlinným olejem ve vznětových motorech

COMBUSTION OF ETHANOL-VEGETABLE OIL BLENDS IN DIESEL ENGINES

Michal Vojtíšek, Josef Laurin, Alexander Barbolla, Radek Holubec, Petr Starý  
Technická univerzita v Liberci

Jedním z potenciálně perspektivních motorových paliv pro vznětové motory jsou rostlinné oleje. Oproti naftě mají mírně vyšší hustotu, mírně nižší výhřevnost, o řád vyšší viskozitu, výrazně vyšší bod tání a teplotu vzplanutí a značně nižší oxidační stabilitu.

Naftové motory bývají pro provoz na rostlinné oleje upraveny jako dvoupalivové, kde je do vstřikovacího čerpadla přiváděna buď nafta, nebo rostlinný olej ohřátý na teplotu 50–90 °C, buď elektrickým ohřívacem, nebo odpadním teplem odebraným z chladicí kapaliny motoru. V Evropě se dnes využívá především řepkový olej palivové kvality, jehož vlastnosti jsou uvedeny v tab. I.

Výzkumné práce (1, 2, 3) vedené prvním autorem a prováděné na několika vznětových motorech poukazují na silný vliv provozních podmínek motoru na průběh spalování řepkového oleje a na výsledné výfukové emise. Výsledky prací ukázaly, že v porovnání s naftou dochází při nízkých otáčkách a zatíženích motoru ke vznícení řepkového oleje až o jednotky stupňů pootočení klikového hřídele později. Při nízkých otáčkách a zatíženích byly výrazně (až o řád) vyšší emise částic (PM) a uhlovodíků (HC) a vyšší emise oxidu uhelnatého (CO). Emise oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>) pak byly až o desítky procent nižší.

Jako jedno z možných řešení nepříznivého průběhu spalování rostlinného oleje při nízkých zatíženích a s ním spojených vyšších emisí HC, CO a PM byl uvažován přídavek menšího množství etanolu.

Etanol, palivo vyráběné z domácích obnovitelných zdrojů (4), je využíván především pro zážehové motory přimícháváním jednotek procent do benzínu pro běžné motory, nebo jako palivo E85 obsahující cca 85 % ethanolu (5). Pro vznětové motory je určeno palivo E95 obsahující 95 % ethanolu (6, 7). Experimentálně je etanol přidáván v malých koncentracích do motorové nafty (8).

Etanol má oproti naftě nižší hustotu, nižší viskozitu a nižší bod vzplanutí, zatímco hustota, viskozita i bod vzplanutí rostlinného oleje jsou oproti naftě vyšší. Etanol má i vyšší rychlost šíření plamene (9). Vlastnosti etanolu jsou uvedeny v tab. I.

Zatímco vyšší viskozita a horší odpařitelnost rostlinného oleje může vést k prodloužení doletu kapiček nafty (penetrace), délka penetrace paprsku paliva byla přísadou etanolu snížena a úhel rozstříku byl větší (10). Přídavkem 2,5–7,5 % ethanolu do rostlinného oleje se jeho viskozita při 20 °C snížila o 9–28 % a oproti provozu na čistý rostlinný olej se zvýšila celková účinnost motoru (11).

Vliv přídavku menších množství (2–15 %) etanolu do motorové nafty není na emise jednoznačný, review několika předchozích prací ale uvádí zpravidla vyšší emise HC s nejednoznačným vlivem na emise CO (8); vyšší HC a stejné nebo nižší CO

potvrzuje i (12), jiné studie poukazují na snížení HC i CO (9, 13), ale i zvýšení HC a CO, a to zejména v nižších zatíženích (10).

Cílem této práce je experimentální zjištění vlivu přísady bioetanolu do rostlinného oleje na průběh spalování a na výfukové emise.

## Motor, zkušební zařízení a paliva

Pro experimentální práce byl použit traktorový motor Zetor 1505, přeplňovaný řadový čtyřválec o zdvihovém objemu 4,16 dm<sup>3</sup>, vrtání válců 105 mm, zdvih pístů 120 mm a s maximálním výkonem 90 kW při otáčkách 2 200 l.min<sup>-1</sup>. Motor, jehož příslušenství je podrobně specifikováno v (1), má mechanicky řízené řadové vstřikovací čerpadlo Motorpal, recirkulaci výfukových plynů a palivové příslušenství umožňující provoz jednak na motorovou naftu, jednak na rostlinný olej, který je ohříván na teplotu 60–80 °C.

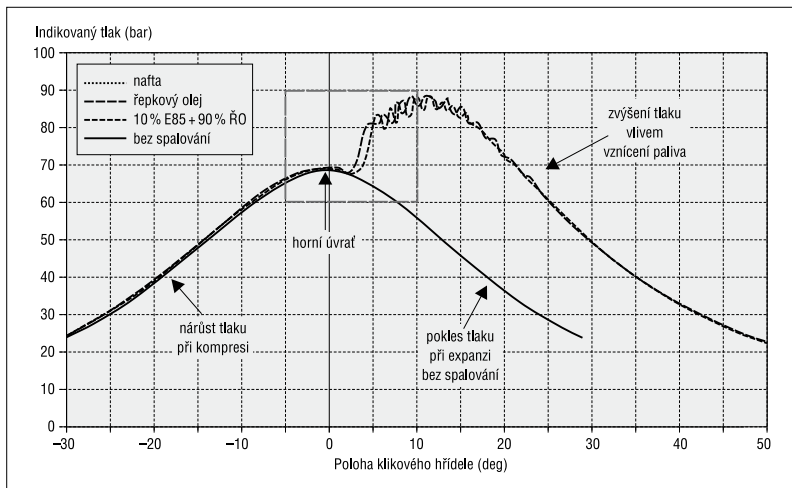
Motor byl instalován na zkušební stanoviště s hydraulickým dynamometrem Schenck Dynabar 630 a byl vybaven potřebným měřicím zařízením k snímání provozních parametrů. Pro měření průběhů tlaku ve válci bylo použito měřicí zařízení Indimeter (AVL) a pro měření škodlivých výfukových emisí příslušné analyzátory vyhovující požadavkům předpisu EHK pro homologační zkoušky.

Do řepkového oleje od firmy FabioProdukt, Holín, vyhovujícího ČSN 65 6516, bylo přimícháno 10 % hm. paliva E85 ze společnosti Agroetanol TTD Dobrovice, obsahujícího přibližně

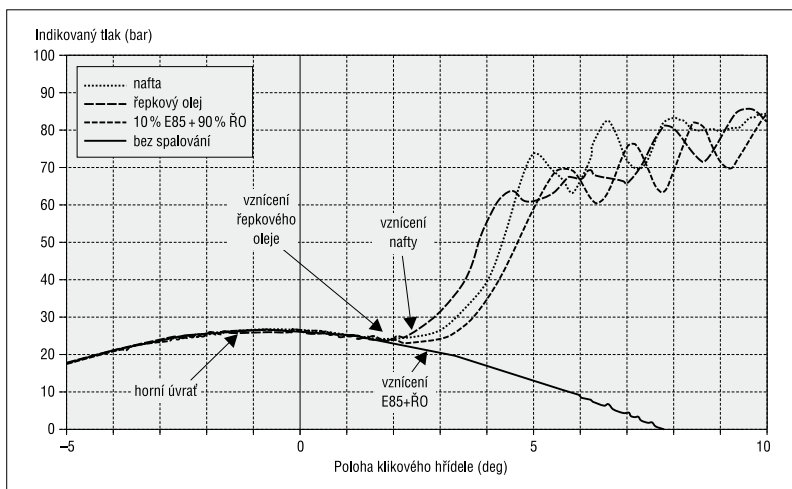
Tab. I. Vybrané parametry motorové nafty (1), řepkového oleje (1) a etanolu (11)

Parametr	Palivo		
	nafta	etanol	řepkový olej
Norma	ČSN EN 590	–	ČSN 65 6516
Hustota při 15 °C (kg.m <sup>-3</sup> )	820–845	790	900–930
Viskozita při 40 °C (mm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	2,0–4,5	1,4	<36
Bod vznícení (°C)	>55		>220
Cetanové číslo	>51	8	>39
Skutečné vlastnosti (nepředepsané normou)			
Výhřevnost (MJ.kg <sup>-1</sup> )	42–43	26,8	36–37
Obsah kyslíku (% hm.)	zanedbatelný	35	10–11%

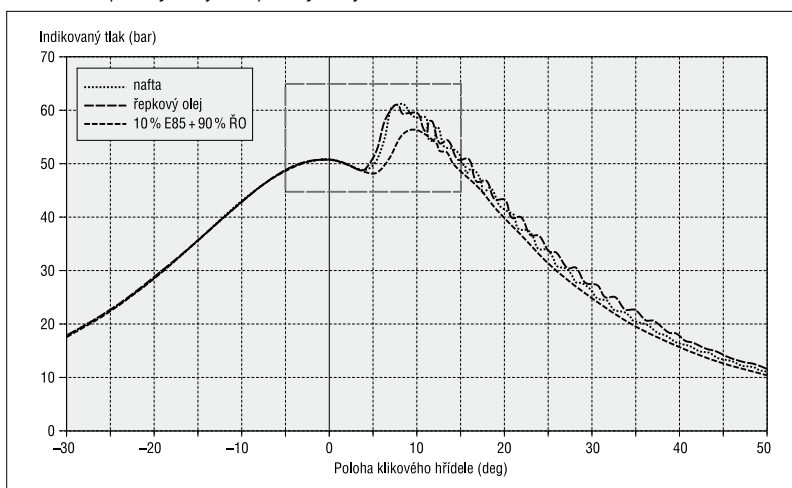
Obr. 1. Indikované tlaky ve spalovacím prostoru motoru při otáčkách nejvyššího točivého momentu ( $1\,500\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ ) a při 50% zatížení při provozu na naftu, řepkový olej a řepkový olej s 10% hmot. E85



Obr. 2. Indikované tlaky ve spalovacím prostoru motoru při otáčkách  $1\,500\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  a 50% zatížení – výřez oblasti počátku hoření nafty, řepkového oleje a řepkového oleje s 10% E85



Obr. 3. Indikované tlaky ve spalovacím prostoru motoru při otáčkách nejvyššího točivého momentu ( $1\,500\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ ) a při 10% zatížení při provozu na naftu, řepkový olej a řepkový olej s 10% hmot. E85



85 % etanolu, 15 % automobilového benzínu a denaturační činidla. Pro porovnání byla provedena měření s motorovou naftou dle ČSN EN 590.

### Výsledky a diskuze

Střední hodnota maximálního točivého momentu při otáčkách  $1\,500\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  byla  $526\text{ Nm}$  při provozu na naftu (hodnota deklarovaná výrobcem je  $525\text{ Nm}$ ),  $498\text{ Nm}$  při provozu na čistý ohřátý řepkový olej a  $475\text{ Nm}$  při provozu na ohřátý řepkový olej s 10 % E85.

Střední hodnota teploty výfukových plynů za turbínou při otáčkách  $1\,500\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  byla  $526\text{ °C}$  při provozu na naftu,  $475\text{ °C}$  při provozu na čistý ohřátý řepkový olej a  $455\text{ °C}$  při provozu na ohřátý řepkový olej s 10 % E85.

Průběhy indikovaných tlaků ve spalovacím prostoru druhého válce motoru jsou vyneseny pro vybrané provozní režimy na obr. 1. až obr. 6., a to vždy při provozu na naftu, ohřátý řepkový olej a ohřátý řepkový olej s příměsí 10 % paliva E85.

Na obr. 1. jsou porovnány indikované tlaky pro otáčky maximálního točivého momentu ( $1\,500\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ ) při cca 50% zatížení ( $225\text{ Nm}$ ). Toto zatížení odpovídá 50 % nominálního maximálního zatížení při provozu na řepkový olej ( $450\text{ Nm}$ ); při provozu na naftu byl maximální točivý moment motoru mírně vyšší, oproti tomu při provozu na řepkový olej s 10 % E85 byl maximální točivý moment mírně nižší. Na vodorovné ose je vynesena poloha klikového hřídele vzhledem k horní úvrat, na svislé ose pak indikovaný tlak. Při kompresi tlak narůstá, dosahuje svého vrcholu přibližně v horní úvrat a poté, není-li spalováno palivo, při expanzi klesá, přičemž křivka tlaku je přibližně symetrická kolem osy vyznačující polohu horní úvrat; hypotetická křivka tlaku bez spalování paliva je vynesena pro ukázkou na obr. 1. Při spalování paliva však tlak kolem, nebo krátce po horní úvrat, narůstá. V tomto případě dochází přibližně dva stupně za horní úvrat vlivem vznícení a hoření paliva k prudkému nárůstu tlaku. Následný rozkmit tlakového signálu vzniká oscilacemi ve spojovacím kanálku mezi spalovacím prostorem a aktivní plochou snímače tlaku. Detail průběhu nárůstu tlaku, ze kterého je možné porovnat počátek hlavní fáze hoření a rychlost hoření pro jednotlivá paliva, je na obr. 2. Zde je patrné, že zatímco počátek hlavní fáze hoření nastává u řepkového oleje dříve než u nafty, u řepkového oleje s 10 % E85 nastává později vzhledem k řepkovému oleji i k naftě. Obdobné rozdíly byly pozorovány při vyšších zatíženích a při vyšších otáčkách motoru. Se snižujícím se zatížením se však počátek hlavní fáze hoření směsi řepkového oleje s 10 % E85 dále opožďuje, což je vyjádřeno na obr. 3. pro  $1\,500\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  a 10% zatížení, s výřezem oblasti počátku hoření na obr. 4. Nejvíce je opožděn počátek hoření řepkového oleje s 10 % E85 při

volnoběhu, kde je spalování čistého řepkového oleje považováno za velmi problematické, a jak je patrné z obr. 5. a výřezu oblasti počátku hoření na obr. 6., počátek hoření je u řepkového oleje opožděn oproti naftě.

O nedokonalém hoření při nízkých zatíženích vypovídají i průběhy koncentrací HC, vnesených na obr. 7., a koncentrací CO, vnesených na obr. 8. Zde je patrné, že koncentrace HC i CO jsou při spalování řepkového oleje s 10 % E85 nižší při vysokých otáčkách a při vyšších zatíženích, při otáčkách 1 500 1.min<sup>-1</sup> se však se snižujícím se zatížením koncentrace HC i CO zvyšují a při 10% zatížení a při volnoběhu jsou výrazně vyšší oproti provozu na čistý řepkový olej i na naftu. Při vysokých zatíženích však spalování řepkového oleje z emisního hlediska problematické není.

Poněkud vyšší koncentrace HC i CO při chodu motoru na řepkový olej v maximálním zatížení, které se postupem času snižují, jsou důsledkem usazování organických látek s vyšším bodem varu ve výfukovém systému motoru. Přidáním E85 se však tento vliv předchozích režimů snížil, jak je patrné z průběhů koncentrací HC i CO od čtvrté do osmé minuty testu. Lze se proto domnívat, že přísadou E85 se mění složení organických látek ve výfukových plynech a že se snižuje potenciál pro tvorbu úsad.

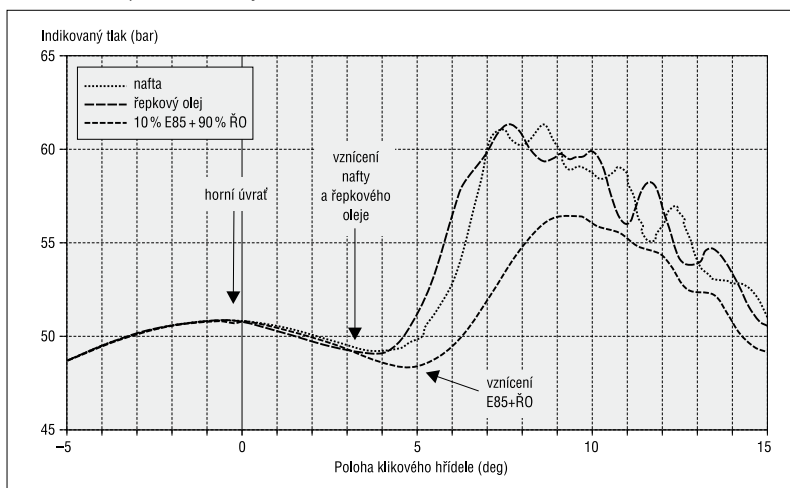
Emise NO<sub>x</sub>, vnesené na obr. 9., byly při provozu na řepkový olej s 10 % E85 a naftu srovnatelné. Přísadou E85 se tak kompenzovalo zvýšení NO<sub>x</sub> při provozu na čistý řepkový olej, dané dřívějším vznícením paliva. To odpovídá i zpoždění vznícení u řepkového oleje s 10 % E85 oproti čistému řepkovému oleji, viz. obr. 1. a 2.

Přísada E85 přináší jisté výhody – kompenzace zvýšených emisí NO<sub>x</sub>, snížení emisí HC a CO v oblasti vyšších zatížení a potenciálně nižší míru tvorby úsad při nízkých zatíženích. Zároveň je ovšem spojena s výraznými nevýhodami ve formě zpoždění vznícení paliva, pomalejšího hoření a vyšších emisí HC a CO při nízkých zatíženích, při plném zatížení je pak nevýhodou úbytek výkonu, a to cca 5 % oproti čistému řepkovému oleji a o cca 10 % oproti naftě.

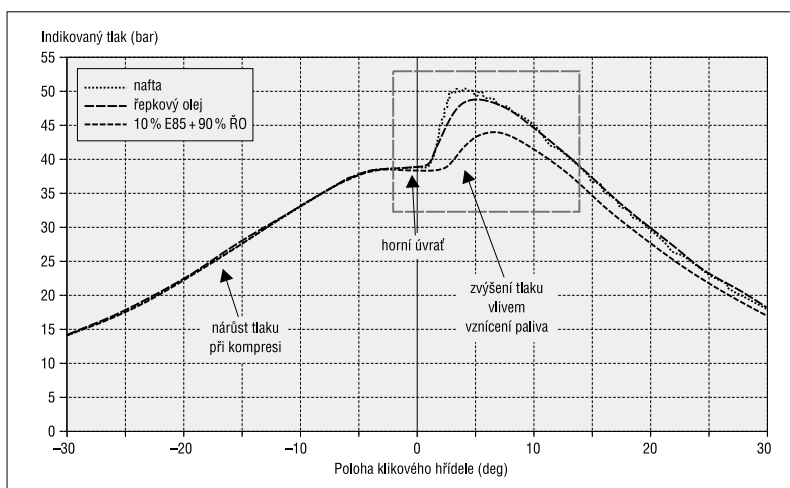
## Závěr

V práci byl vyšetřován vliv příměsi 10 % hm. etanolu na spalování ohřátého řepkového oleje v traktorovém motoru Zetor 1505 a na výfukové emise. Při nízkých zatíženích, kdy u řepkového oleje je vznícení opožděno a hoření probíhá v porovnání s naftou pomaleji, jsou vyšší emise PM, HC a CO a spalování je problematické, došlo příměsí etanolu k ještě výraznějšímu opoždění vznícení, k zpomalení hoření a k dalšímu zvýšení emisí HC a CO. Při vyšších zatíženích bylo pozorováno snížení emisí HC, CO i NO<sub>x</sub>, zde však spalování rostlinného oleje není považováno

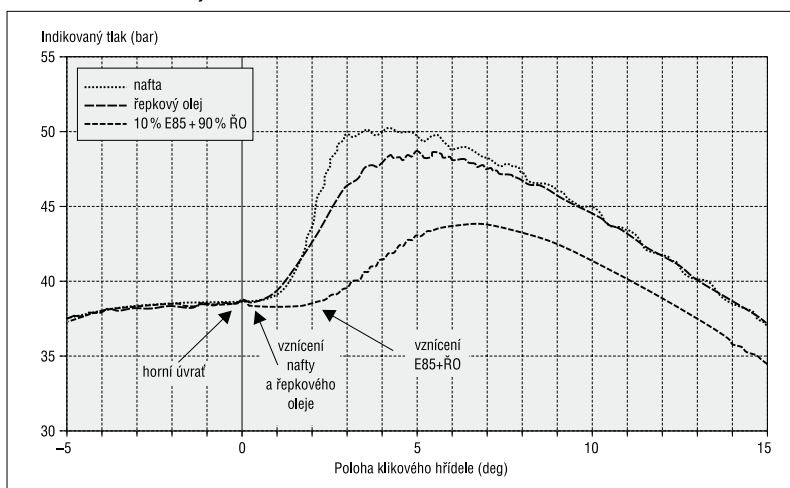
Obr. 4. Indikované tlaky ve spalovacím prostoru motoru při otáčkách 1 500 1.min<sup>-1</sup> a 10% zatížení – výřez oblasti počátku hoření nafty, řepkového oleje a řepkového oleje s 10% E85



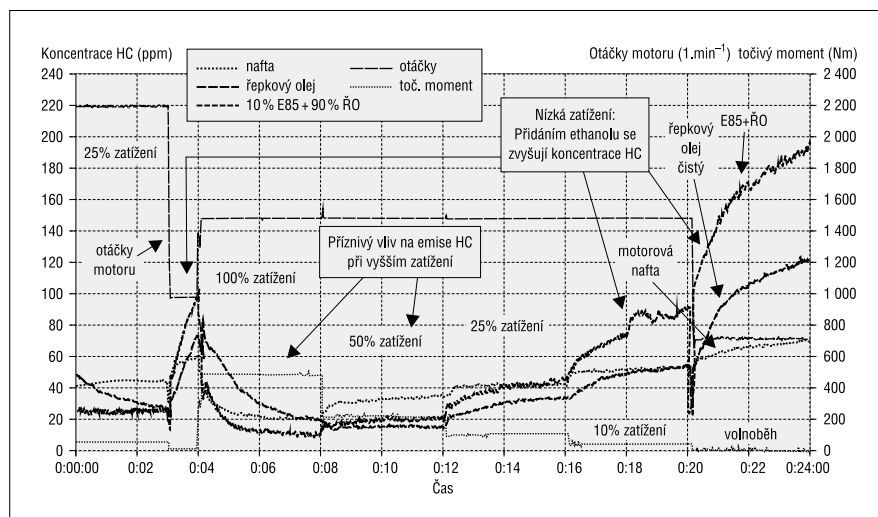
Obr. 5. Indikované tlaky ve spalovacím prostoru motoru při volnoběhu (780 1.min<sup>-1</sup>) při provozu na naftu, řepkový olej a řepkový olej s 10% hmot. E85



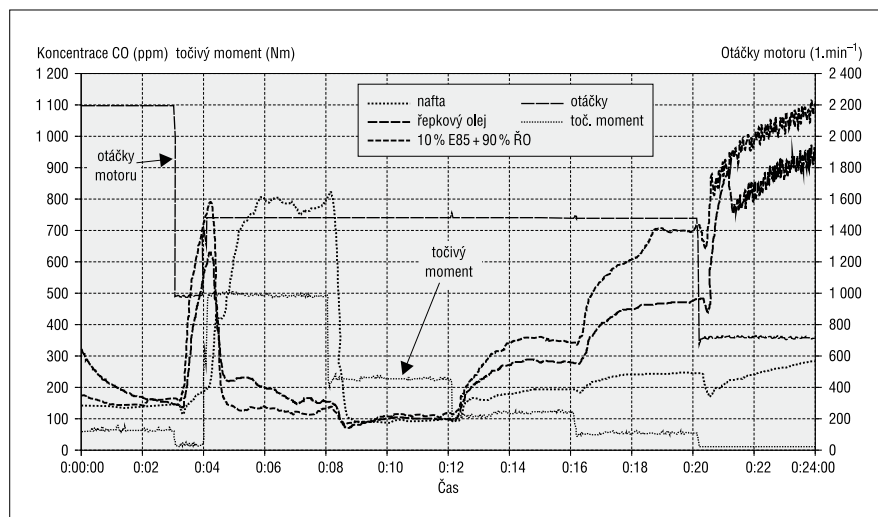
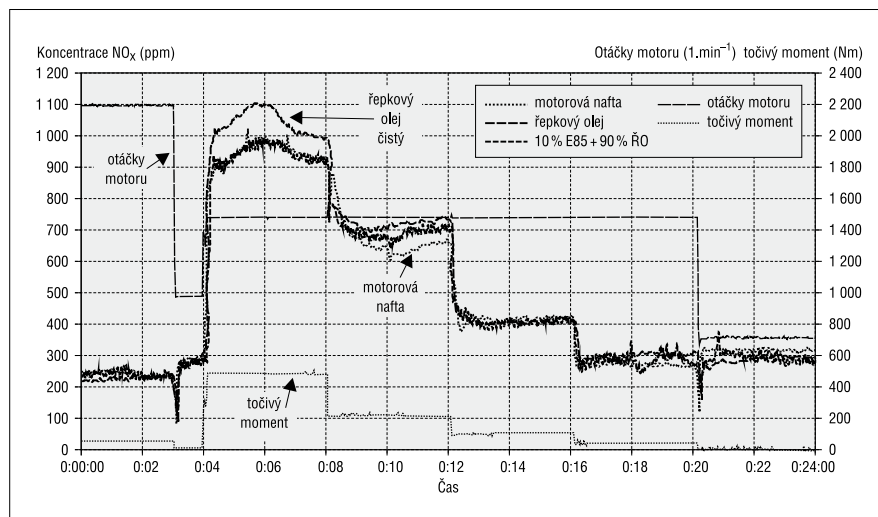
Obr. 6. Indikované tlaky ve spalovacím prostoru motoru při volnoběhu (780 1.min<sup>-1</sup>) – výřez oblasti počátku hoření nafty, řepkového oleje a řepkového oleje s 10% E85



Obr. 7. Průběhy koncentrací HC – porovnání provozu na řepkový olej, řepkový olej s 10 % E85 a motorovou naftu



Obr. 8. Průběhy koncentrací CO – porovnání provozu na řepkový olej, řepkový olej s 10 % E85 a motorovou naftu

Obr. 9. Průběhy koncentrací NO<sub>x</sub> – porovnání provozu na řepkový olej, řepkový olej s 10 % E85 a motorovou naftu

za problematické. Bez vhodného ošetření režimů nízkých zatížení je proto pro běžně provozované motory přínos příměsi etanolu do rostlinného oleje diskutabilní.

*Příspěvek vznikl v rámci projektu Grantové agentury ČR GA101/08/1717 „Optimalizace spalování rostlinných olejů ve vznětových motorech“ a projektu Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR 1M0568 „Výzkumné centrum spalovacích motorů a automobilů Josefa Božka II“.*

## Souhrn

Rostlinné oleje, palivářsky používané především pro výrobu bionafty, lze též přímo spalovat ve vznětových motorech v jejich původní neesterifikované formě. Vzhledem k vysoké viskozitě a vyššímu bodu vzplanutí rostlinných olejů je jejich využití jako motorových paliv možné při zvýšené teplotě, v ohřátém motoru a při středních a vyšších zatíženích motoru. Tato práce vyšetřuje návrh snížit viskozitu i bod vzplanutí olejů přimíšením malého množství etanolu. Měření provedená na typickém traktorovém motoru Zetor 1505, poháněném ohřátým řepkovým olejem palivové kvality, s přísadou 10 % hm. komerčního paliva E85 (85 % etanol) poukazuje na možné dílčí přínosy při vyšších zatíženích motoru, kdy jsou průběh spalování řepkového oleje i výfukové emise příznivé. Při nízkých zatíženích, kdy je spalování řepkového oleje problematické, bylo naopak zjištěno zhoršení průběhu hoření paliva a výrazné zvýšení emisí HC a CO. Přidávání etanolu do rostlinného oleje tudíž při nízkých zatíženích motoru zhoršuje průběh spalování i výfukové emise a z tohoto důvodu ho nelze doporučit.

**Klíčová slova:** etanol, řepkový olej, vznětový motor, průběh spalování, výfukové emise.

## Literatura

1. VOJTÍŠEK, M.: *Vliv provozních podmínek na spalování rostlinných olejů ve stávajících vznětových motorech a na výfukové emise*. Liberec, 2009, 138 s. Doktorská disertační práce na Katedře vozidel a motorů FS TU v Liberci.
2. VOJTÍŠEK-LOM, M. ET AL.: Effects of Current and Prior Operating Conditions on Particulate Matter Emissions from a Diesel Engine Operated on Heated Rapeseed Oil. *Society of Automotive Engineers Technical Paper Series*, 2009, dokument 2009-01-1913, 14 s.
3. VOJTÍŠEK-LOM, M. ET AL.: Investigation of Combustion Rates and Injection and Ignition Onset of Heated Rapeseed Oil in Direct-Injection Turbodiesel Engines. *Society of Automotive Engineers Technical Paper Series*, 2009, dokument 2009-01-1914, 18 s.

4. HROMÁDKO, J. ET AL.: Výroba bioetanolu. *Listy cukrov. řepář.*, 126, 2010 (7/8), s. 267–271.
5. MILER, P. ET AL.: Zhodnocení ekologického potenciálu paliva E85. *Listy cukrov. řepář.*, 125, 2009 (5/6), s. 180–184.
6. HROMÁDKO, J. ET AL.: Využití etanolu ve vznětových motorech. *Listy cukrov. řepář.*, 125, 2009 (1), s. 24–28.
7. HROMÁDKO, J. ET AL.: Využití paliva E95 ve vznětových motorech. *Listy cukrov. řepář.*, 127, 2011 (2), s. 63–66.
8. HANSEN, A. C.; ZHANG, Q.; LYNE, P. W.: Ethanol-diesel fuel blends – a review. *Bioresource Technology*, 96, 2005 (3), s. 277–285.
9. SAYIN, C.: Engine performance and exhaust gas emissions of methanol-diesel and ethanol-diesel blends. *Fuel*, 89, 2010 (11), s. 3410–3415.
10. PARK, S. H. ET AL.: Influence of ethanol blends on the combustion performance and exhaust emissions characteristics of a four-cylinder diesel engine at various engine loads and injection timings. *Fuel*, 90, 2011 (2), s. 748–755.
11. LABECKAS, G.; SLAVINSKAS, S.: Comparative performance of direct injection diesel engine operating on ethanol, petrol and rapeseed oil blends. *Energy Conversion and Management*, 50, 2009 (3), s. 792–801.
12. RAKOPOULOS, D. C. ET AL.: Effects of ethanol-diesel fuel blends on the performance and exhaust emissions of heavy duty DI diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 49, 2008 (11), s. 3155–3162.
13. DI, Y.; CHEUNG, C. S.; HUANG, Z.: Comparison of the effect of biodiesel-diesel and ethanol-diesel on the gaseous emissions of a direct-injection diesel engine. *Atmospheric Environment*, 43, 2009 (17), s. 2721–2730.

### Vojtíšek M., Laurin J., Barbolla A., Holubec R., Starý P.: Combustion of Ethanol-Vegetable Oil Blends in Diesel Engines

Vegetable oils, utilized in transportation primarily as a feedstock for biodiesel, can be also combusted in diesel engines in their neat, non-esterified form. Given the high viscosity and high flash point of vegetable oils, they need to be used heated, in a warm engine, operated at moderate to high loads. This study examines the possibility to reduce the viscosity and the flash point of vegetable oils by blending with a small quantity of ethanol. Experimental work carried on a typical tractor diesel engine Zetor 1505, fueled by heated fuel-grade rapeseed oil in its neat form and with 10 % by weight of commercial E85 fuel containing 85% ethanol, reveals emissions benefits (decrease in HC, CO and NO<sub>x</sub>) at higher loads, where the combustion of rapeseed oil is not considered to be problematic. At low loads, where rapeseed oil combusts poorly, the addition of ethanol further delayed the combustion and increased both HC and CO emissions. Addition of ethanol, while in some ways possibly beneficial, thus does not appear to improve the problematic combustion of vegetable oils at low loads.

**Key words:** ethanol, rapeseed oil, vegetable oil, diesel engines, combustion, emissions.

### Kontaktní adresa – Contact address:

Michal Vojtíšek, M.S., Ph.D., Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů, Studentská 2, 461 17 Liberec, Česká republika, e-mail: michal.vojtisek@tul.cz

### Příznivá bilance pro palivo E85

Motorové palivo E85 vyrábí společnost Cukrovary a lihovary TTD v Dobručce smícháním 85 % bioetanolu ze suroviny – cukrovky s 15 % klasického benzínu Natural. Motorové palivo E85 má několik výhod: je šetrnější k životnímu prostředí, při jeho spalování vzniká méně skleníkových plynů, a to o 57 % u bioetanolu z obilí, 73 % u vyrobeného z cukrovky. Pozitivní je i energetická bilance: poměr vyrobené energie a energie nutné k výrobě je u benzínu 0,82, tedy záporný, u bioetanolu je tato bilance pro výrobu z pšenice 1,61, z cukrovky 1,69 a z kukuřice 1,74, tedy kladný. Neméně důležitým přínosem paliva E85 je, že se vyrábí kompletně z domácích surovin a není tedy závislé na dovozu suroviny – nafty. Palivo E85 má i vyšší oktanové číslo 109 proti 95 u Naturalu. Významná je i skutečnost, že na trhu stále roste nabídka automobilů, schopných toto ekologické palivo spalovat. Mimo zahraničních automobilek dodává vozy, značené FFV, u nás i Škoda Auto v několika verzích.

*Energie 21, 4, 2011, č. 1, s. 53.*

Čiž

Lang, Ch.

### Zavlažování cukrovky se vyplácí (Zuckerrübenbereggen lohnt sich!)

Potřebná vodní kapacita pozemku (v mm vody pro určitou hloubku půdy) a schopnost půdy přijímat a zadržovat vodu závisí na jejím složení a na hloubce. Pod 30 % potřebné vodní kapacity nastává u rostlin vodní stres. Optimální je 50–80%

ROZHLEDY

nabídka vody, nad tyto hranice může nastat přezásobením vodou nebo nedostatek kyslíku. Zatímco písčité půdy zadržují v hloubce 60 cm 66–104 mm vody, jílovité 160–300 mm, písčité půdy tedy vyžadují častější závlahu. Ke zvlhčení na 80 % stačí jílovité půdě na 10cm vzdálenost 4 mm, písčité asi 6,3 mm zavlažovací vody. Tyto dávky mají trvat do konce srpna. Za den se podle teploty a vlhkosti odpaří 3–6 mm vody.

Dobré zásobení vodou má za následek, že dusík přechází na bílkovinnou formu a tím se snižuje riziko vyššího obsahu škodlivého dusíku. Cukrovka využívá právě dusíkatých a minerálních látek k ochraně před buněčným stresem. Při polních pokusech bylo zjištěno, že zavlažováním stoupl obsah cukru v průměru o 0,3 % v daném případě na 17,61 % abs.

*Zuckerrübenzeitung, 46, 2010, č. 3, s. 14.*

Čiž

### Energie z cukrové řepy

Cukrová řepa má vysoký obsah sacharidů, což je důležité pro proces fermentace na bioplyn. Obvykle se do substrátu dává třetina bulev cukrovky a dvě třetiny siláže. Bulvy se mohou použít celé, nebo se společně s kukuřicí krájí, případně jinak rozmělní. Z jedné tuny cukrovky se získá 160–180 m<sup>3</sup> plynu, tedy asi 85–95 m<sup>3</sup> metanu, to je kolem 20 MW.ha<sup>-1</sup>. Cukrová řepa musí být dobře očištěná, zbavená zeminy, opraná, podle výrobních podmínek a potřeby ji lze skladovat.

*Energie 21, 4, 2011, č. 1, s. 24.*

Čiž