

VYUŽITÍ BIOBUTANOLU VE VZNĚTOVÝCH MOTORECH A JEHO VLIV NA PARAMETRY MOTOROVÉ NAFTY

VLADIMÍR HÖNIG^a, JAN HROMÁDKO^b
a MATYÁŠ ORSÁK^a

^a *Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů,*

^b *Technická fakulta, Česká zemědělská univerzita v Praze,*

Kamýčká 129, 165 21 Praha 6 Suchbátka

honig@af.czu.cz

Došlo 3.3.15, přijato 18.6.15.

**Rukopis byl zařazen k tisku v rámci placené služby
urychleného publikování.**

Klíčová slova: butanol, ethanol, motorová nafta, destilační
křivka, mazivost

Úvod

Evropská unie je jedním z hlavních představitelů boje za snižování skleníkových plynů. Z pohledu dlouhodobé udržitelnosti dopravy představuje dva největší problémy spotřeba fosilních paliv a produkce oxidu uhličitého. Určitým klíčem ke snižování produkce skleníkových plynů je zavádění obnovitelných zdrojů energie v oblasti energetiky a průmyslu. V sektoru dopravy to je pak zlepšení účinnosti spalování v motorech a výrazný nárůst využívání biopaliv. Bioethanol a biobutanol se mimo minimálních dopadů na životní prostředí oproti tradičním fosilním palivům vyznačují také poměrně snadnou výrobou. V podmínkách České republiky je vhodným zdrojem zrnová kukuřice a cukrová řepa¹. U záměrně pěstované biomasy vyvstává ekonomický problém způsobený vysokými cenami surovin, použití odpadních materiálů s vysokým obsahem lignocelulosity

a jejich následný cenový vývoj zatím nelze optimálně predikovat².

Možnost aplikace alkoholu do motorové nafty byla již zvažována v zemích, které se intenzivně zabývají využitím bioethanolu jako pohonné hmoty v dopravě. Jsou jimi hlavně Švédsko, USA či Brazílie. Bylo zjištěno, že příměs bioethanolu má pozitivní vliv na snížení kouřivosti motorů, pevných částic, NO_x a CO (cit.³).

Alkoholy nelze i přes výraznou aditivaci spalovat v běžných vznětových motorech, avšak je možné a nutné provést jejich úpravu, po které již nelze motor provozovat na běžnou naftu. V současné době je tento způsob využíván firmou Scania, která ve švédském Stockholmu provozuje na 200 městských autobusů. Palivo, které je pak používáno v těchto motorech, nese označení E95 a skládá se z 95 % ethanolu a 5 % aditiv podporujících vznětlivost a mazivost^{2,3}.

Byla postupně vyvinuta také vozidla s označením Diesel Flexi-Fuel představující určitou obdobu FFV vozidlům (Flexible-Fuel Vehicle) určená ke spalování vysoko-percentních lihobenzinových směsí. Je tedy možné se setkat také s alternativou ve formě E-dieselu, který nachází uplatnění zejména u těžkých nákladních vozidel a zemědělské techniky. Obsahuje cca 7–15 obj.% ethanolu, který může být bezvodý i azeotropický (96 %). Další variantou je také O2DieselTM tvořený ze 7,7 obj. % ethanolu a podle výrobce jej lze použít i do nemodifikovaných motorů s využitím stávající infrastruktury. Distribuce tohoto paliva probíhá především v jižní a jihovýchodní části USA, kde s ohledem na celoroční teploty nehrozí riziko rozfázování paliva a kde je možné dovážet levnější bioethanol z Brazílie.

Bioethanol má však velmi nízké cetanové číslo a je také hygroskopický. Nabízí se tedy možnost využití biobutanolu, který lze vyrábět prakticky ze stejných zdrojů a jehož vlastnosti včetně větší výhřevnosti předurčují jeho využití ve vznětových motorech spíše než bioethanol.

Použití biobutanolu ve vznětových motorech je však neméně složité oproti využití v zážehových motorech způsobené odlišnými parametry alkoholu a motorové nafty (viz tab. I). Vznětlivost biobutanolu (cetanové číslo) je sice vyšší než u bioethanolu, avšak musí být zvýšena spe-

Tabulka I

Porovnání základních parametrů motorové nafty, benzínu, bioethanolu a biobutanolu

Parametr	Nafta	Benzin	Bioethanol	Biobutanol
Hustota při 15 °C, kg m ⁻³	820–845	720–775	789	813
Cetanové číslo	> 51	–	7	17
Oktanové číslo VM	–	91–100	108	94
Výhřevnost, MJ dm ⁻³	36	31	21	27
Výhřevnost hmotnostní, MJ kg ⁻¹	42,6	43,6	28,9	33,1
Obsah kyslíku, hm.%	–	< 2,7	34,7	21,6
Bod varu, °C	163–357	30–215	78	118
Bod tání, °C	–	–	–114,4	–88,6

ciálními aditivy. Je zapotřebí brát v úvahu i další rozdílné vlastnosti ve srovnání s motorovou naftou, a to mazací schopnost či agresivní působení vůči některým součástkám^{2–5}.

Jednou z možností, jak využít biobutanol ve spalovacích motorech, je využití dvoupalivového systému s oddělenou nádrží. Lze použít např. vstřík biobutanolu do spalovacího prostoru samostatným vstříkovačem současně se vstříkem zapalovací dávky motorové nafty druhým vstříkovačem.

Další možnost spočívá v nasávání zápalné směsi alkoholu se vzduchem. Příprava směsi se uskutečňuje obdobně jako v motorech zážehových buď v karburátoru, nebo nízkotlakým vstříkáváním před sací ventil. Samotné zapálení směsi je zajištěno opět vstříknutím zapalovací dávky motorové nafty^{3,6}.

Jako vhodné řešení využití biobutanolu ve vznětových motorech se ale jeví i jeho přímé přidávání do motorové nafty o limitovaném množství.

Experimentální část

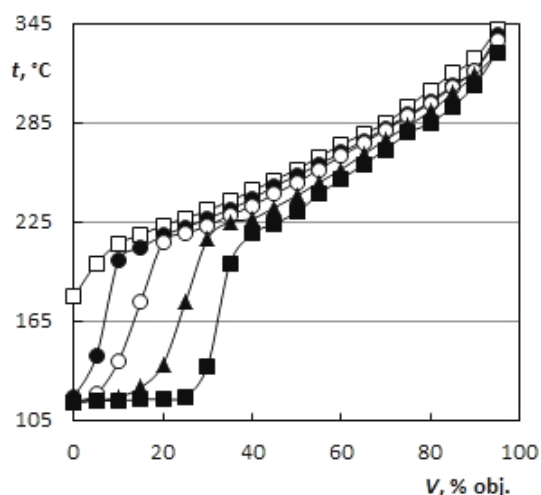
S přihlédnutím k výše uvedeným možnostem využití alkoholů ve vznětových motorech byly připraveny směsi butanolu s motorovou naftou a vyhodnocen vliv butanolu na její parametry.

Pro laboratorní zkoušky byla použita motorová nafta odpovídající normě ČSN EN 590 třídy F – zimní bez obsahu FAME. Testovaný *n*-butanol byl v kvalitě p.a. (LachNer, s.r.o.).

Modelové směsi motorové nafty byly testovány v rámci metod dle ČSN EN 590. Jedná se o hustotu podle ČSN EN ISO 3675, kinematickou viskozitu při 40 °C podle ČSN EN ISO 3104, destilační zkoušku podle ČSN EN 3405, teplotu ztráty filtrovatelnosti (CFPP – cold filter plugging point) podle ČSN EN 116, cetanové číslo podle ČSN EN ISO 5165, cetanový index podle ČSN EN ISO 4264 a mazivost podle ČSN EN ISO 12156-1 za použití přístroje s vysokofrekvenčním vratným pohybem HFRR – korigovaný průměr oděrové plochy (WSD – wear scar diameter 1,4) při 60 °C.

Výsledky a diskuse

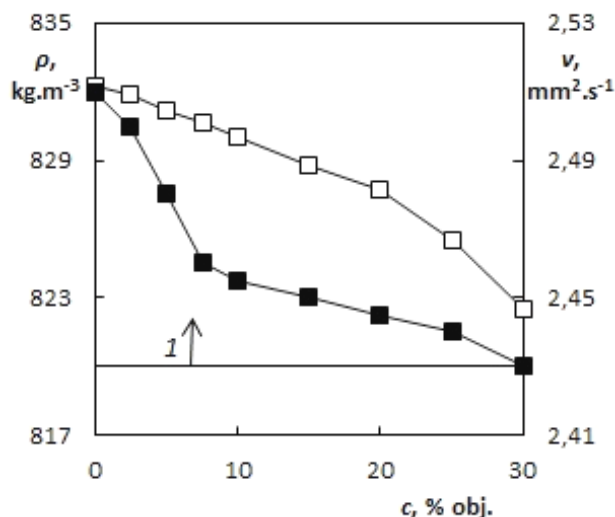
Stanovení destilační křivky je dominantní test, který je nutné provést vždy při posuzování kvality paliva. Z obr. 1 je patrné, že butanol výrazně ovlivňuje již začátek destilační křivky. Příměs butanolu v motorové naftě zabezpečí jemné rozptášení paliva při vstříku, jelikož vzniklé kapičky mají větší celkový povrch a vyšší rychlost odpařování. S ohledem na bod varu butanolu by nemělo docházet k jeho příliš rychlému vypaření po vstříku do válce a tedy nepravidelnému chodu motoru. Ve směsích do 30 obj.% butanolu je současně zajištěna i přítomnost těžších složek obsažených v naftě, které se odpařují postupně během kompresního zdvihu, při kterém se ochlazují stěny spalo-



Obr. 1. Destilační křivky motorové nafty s butanolem. Na ose x je uveden předestilovaný objem V , na ose y teploty destilace t . □ 0 obj.% butanolu; ● 5 obj.% butanolu; ○ 10 obj.% butanolu; ▲ 20 obj.% butanolu; ■ 30 obj.% butanolu

vacího prostoru. Na obr. 1 je vidět, že po oddestilování butanolu pokračuje destilační křivka typickým průběhem destilace motorové nafty.

V případě hustoty nafty nedochází s přidaným butanolem k jejímu výraznému poklesu. I při obsahu 30 obj.% butanolu je splněn požadavek normy min. 820 kg m^{-3} při 15 °C, který je na obr. 2 vyznačen vodorovnou čarou s označením I . Pokles hustoty tak odpovídá rozdílu hustot mezi motorovou naftou a butanolem. Při vyšších koncentracích butanolu lze očekávat jeho vliv na výkon motoru,



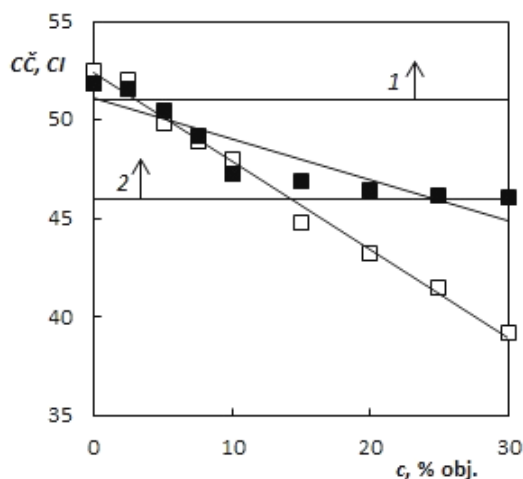
Obr. 2. Hustota r a viskozita n motorové nafty s butanolem. Na ose x je uveden obsah butanolu, na hlavní ose y hustota při 15 °C □, na vedlejší ose y kinematická viskozita při 40 °C ■

jelikož vstřikovací čerpadlo pracuje objemově. Množství vstříknutého paliva roste s jeho měrnou hmotností a poklesem hustoty nafty o 10 kg m^{-3} (30 obj.% butanolu) klesne výkon motoru přibližně o 0,4 % až 1,6 % (cit.³).

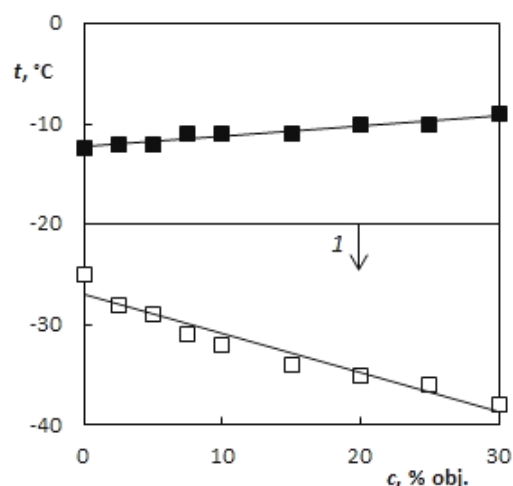
V případě kinematické viskozity při 40°C je průběh odlišný od poklesu hustoty. Dá se usuzovat, že ve výraznějším zakřivení průběhu viskozity v závislosti na obsahu butanolu se projevuje vliv uhlovodíkového řetězce (viz obr. 2). Vliv butanolu na změnu (pokles) viskozity ve svém výsledku ani při testovaných 30 obj.% neposune tento parametr mimo rámec normy ČSN EN 590, který je předepsán od $2,0$ do $4,5 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$.

Oproti přidávání ethanolu tak ani při těchto koncentracích nehrozí riziko poškození pohyblivých součástí palivové soustavy vlivem nízké viskozity a ztráty mazací vrstvičky³. Není ohrožena ani čerpatelnost a průchod filtry, či dokonalé rozptýlení paliva.

Na obr. 3 je vidět změna cetanového čísla a cetanového indexu v závislosti na množství přidaného butanolu. Vodorovnou čarou označenou číslem 1 je znázorněna minimální hodnota cetanového čísla 51 podle požadavků normy ČSN EN 590, vodorovnou čarou označenou číslem 2 potom minimální hodnota cetanového indexu 46 téže normy. S přidáváním butanolu do nafty se projevuje výrazně nižší hodnota jeho cetanového čísla⁷. Přidáním 5 obj.% do testované motorové nafty je cetanové číslo testovaného paliva již pod minimálním požadavkem dané normy. Snížení cetanového čísla se potom projeví tvrdým chodem motoru a jeho vyšší hlučností. Má také negativní vliv na emise zejména při studeném startu, kdy se v motoru nevytvoří dostatečná teplota k prohoření celé dávky paliva. Pro aplikaci butanolu do motorové nafty přichází v úvahu nafty s vyšší rezervou cetanového čísla, nebo přidávání vhodných aditiv (např. dinitropropanu), aby se zkrátila délka okamžiku zpoždění zážehu.



Obr. 3. Cetanové číslo a cetanový index motorové nafty s butanolem. Na ose x je uveden obsah butanolu c , na ose y jednotky cetanového čísla ČČ □ a jednotky cetanového indexu CI ■



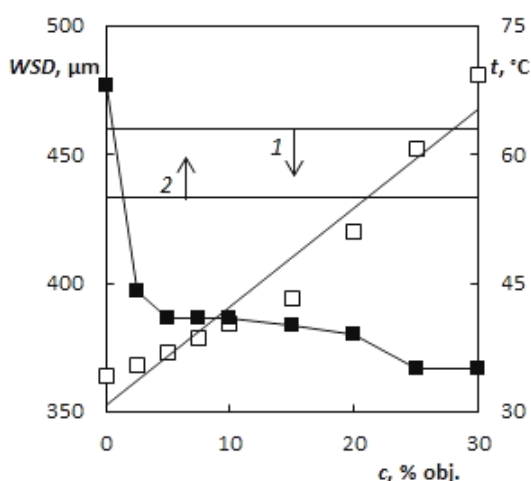
Obr. 4. Teplota ztráty filtrovatelnosti CFPP a bod zákalu motorové nafty s butanolem. Na ose x je uveden obsah butanolu c , na ose y teplota t ztráty filtrovatelnosti □ a teplota bodu zákalu ■

Přidávání butanolu do motorové nafty pozitivně ovlivňuje teplotu ztráty filtrovatelnosti (CFPP). Maximální hodnota určena normou pro zimní motorovou naftu je -20°C a na obr. 4 je vyznačena vodorovnou čarou označenou číslem 1. Vliv příměsi butanolu na bod zákalu (Cloud Point) neboli teplotu vylučování parametrů (TVP) motorové nafty je pouze minimální.

Zkušenosti s konkurenčním ethanolom narážely na obtížnou mísitelnost obou paliv a stálost směsí při nízkých teplotách^{3,8}. Problém v homogenitě směsi ani při velmi nízkých teplotách v případě přidávání butanolu do motorové nafty však nenastává.

Důležitou vlastnost motorové nafty nutnou z hlediska zabezpečení bezchybné funkce palivových čerpadel a vstřikovačů představuje mazivost. Pokud nafta obsahuje příliš „lehkých složek“, hrozí poškození pohyblivých součástí palivové soustavy vlivem výrazně zhoršené mazací schopnosti. Norma předepisuje minimální mazivost nafty prostřednictvím průměru oděrové plochy, která vzniká třením vibrující kuličky na kovové ploše. Maximální povolený průměr plochy $460 \mu\text{m}$ je na obr. 5 vyznačen vodorovnou čarou označenou číslem 1. Této hranice dosáhl až podíl přibližně 25 obj.% butanolu v naftě. Ve směsích s testovanou motorovou naftou do 25 obj.% se tak na pohyblivých součástech vytvářela mazací vrstvička a nedochází k nadměrnému opotřebení. Z pohledu mazivosti nepředstavuje přidávání butanolu očekávané riziko a i tento parametr je však možné upravit pomocí vhodných aditiv.

Jedním z nejčastěji sledovaných jakostních parametrů je také bod vzplanutí. Obecně slouží u hořlavých kapalin k jejich zařazení do třídy nebezpečnosti. Minimální hodnota bodu vzplanutí nafty je výše než 55°C , čímž je zařazena



Obr. 5. Mazivost a bod vzplanutí motorové nafty s butanolem. Na ose x je uveden obsah butanolu c , na hlavní ose y průměr otěrové plochy WSD □, na vedlejší ose y teplota bodu vzplanutí t ■

jako hořlavina 3. třídy. Na obr. 5 je tato hodnota vyznačena vodorovnou čarou označenou číslem 2. Hodnoty bodu vzplanutí čisté motorové nafty se obvykle pohybují mezi 58 a 75 °C. Přidávání butanolu má výrazně klesající tendenci bodu vzplanutí v závislosti na jeho obsahu v naftě. Jak je zřejmé z obr. 5, jeho hodnota je pod minimálním požadavkem normy ČSN EN 590 již při 2,5 obj.%, při vyšších podílech se hodnota přibližuje a přibližně od 25 obj.% odpovídá bodu vzplanutí čistého butanolu. S ohledem na výsledky analýz lze směs motorové nafty s butanolem zařadit mezi hořlaviny 2. třídy. Teplota takto sníženého bodu vzplanutí však nemá vliv na chod vznětového motoru.

Závěr

V článku byla vyhodnocena možnost aplikace butanolu do motorové nafty určené do motorů, které nejsou upraveny pro využití nestandardních paliv. Z provedených analýz vyplývá, že přidávání butanolu je limitované kritérii jednotlivých parametrů motorové nafty, aby byly současně zachovány požadavky normy ČSN EN 590. Nelze jednoznačně určit obecné množství butanolu jako maximální přípustné s ohledem na možnost zlepšení vlastností paliva pomocí aditiv. S ohledem na testované parametry a jejich komplexní vyhodnocení by při použití vhodných přísad bylo možné přidávat butanol i do výše 30 obj.%, avšak jeho spalování by se projevilo poklesem výkonu

a nárůstem spotřeby z důvodu nižší výhřevnosti butanolu. Výsledná směs je klasifikována jako hořlavina 2. třídy, což ale chod vznětového motoru neovlivňuje. Butanol však pozitivně ovlivňuje teplotu ztráty filtrovatelnosti motorové nafty, přičemž je současně zachována i homogenita směsi. Výzvou pro využití těchto směsí je rozšíření biopaliva, které z dlouhodobého hlediska představuje vhodný energetický zdroj.

Tato práce byla realizována v rámci projektu CIGA ČZU č. 20153001.

LITERATURA

- Hönig V., Miler P., Hromádko J.: *Listy Cukrov. Reparske 124*, 203 (2008).
- Hönig V., Kotek M., Mařík J.: *Agronomy Res. 12*, 333 (2014).
- Hromádko J., Hönig V., Hromádko J., Miler P., Schwarzkopf M.: *Listy Cukrov. Reparske 125*, 24 (2009).
- Mužíková Z., Bartoš P., Pospíšil M., Šebor G.: *Chem. Listy 107*, 717 (2013).
- Pospíšil M., Šebor G., Šimáček P., Mužíková Z.: *Chem. Listy 106*, 953 (2012).
- Hromádko J., Hromádko J., Miler P., Hönig V., Štěrba P.: *Chem. Listy 105*, 122 (2011).
- Lujaji F., Bereczky A., Novak C., Mbarawa M.: *Proceedings of WCE 2010 congress: World Congress on Engineering 2010* (Ao S. I., Gelman L., Hukins D. W. L., Hunter A., Korsunsky A. M., ed), str. 2424. Newswood Limited, London 2010.
- Mužíková Z., Šiška J., Pospíšil M., Šebor G.: *Chem. Listy 107*, 638 (2013).

V. Hönig, J. Hromádko, and M. Orsák (*Faculty of Agrobiolology and Food and Natural Resources, Faculty of Technology, Czech University of Agriculture, Prague*): **Biobutanol Use in Diesel Engines and Its Influence on Diesel oil Parameters**

Biobutanol can replace bioethanol used in gasoline and it can be also added as admixture to diesel oil. Although butanol is more often considered for use in gasoline, this article evaluates blends of butanol with diesel oil from the viewpoint of fuel properties and technical adjustment of the fuel system. The EN 590 standard for diesel fuel is well maintained by a single butanol amount parameter in diesel oil without other additives. The obtained parameters of diesel oil with the butanol content below 30 vol.% are suitable for unmodified engines.