

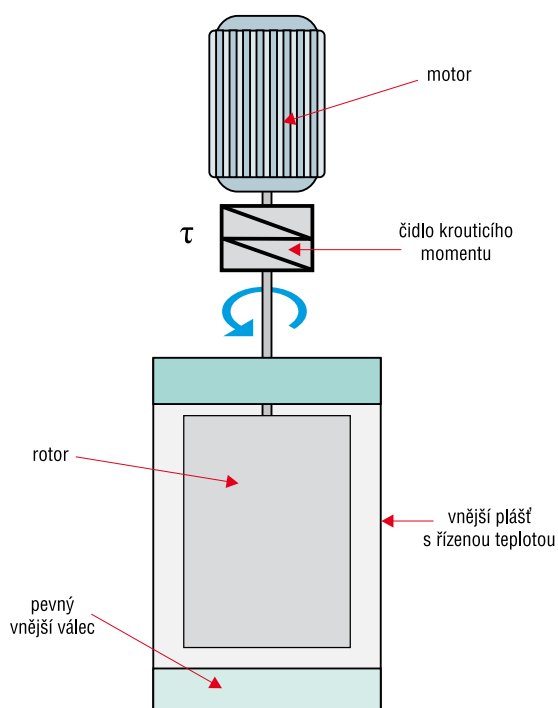
Fyzikální a mechanické vlastnosti směsí bioetanolu a benzínu

Physical and Mechanical Properties of Bioethanol and Gasoline Blends

Vojtěch Kumbár, Adam Polcar, Jiří Votava – Mendelova univerzita v Brně

Bioetanol je v ethanol, který je vyroben technologií alkoholové fermentace z biomasy, a to převážně z plodin obsahujících větší množství sacharidů (cukrová řepa, cukrová třtina) nebo škrobů (brambory, kukuřice, obilí). U plodin, které obsahují sacharidy, se fermentace provádí přímo. U plodin obsahujících větší množství škrobu se tento škrob nejprve musí enzymaticky přeměnit na cukry a poté teprve fermentovat (1). Pro výrobu bioetanolu je v Evropě hlavní surovinou pšenice, a cukrová řepa. Cukrová řepa má pro výrobu bioetanolu ve srovnání s pšenicí několik výhod: dosahuje vyšších výnosů, má kratší dobu vegetačního růstu, vyšší přizpůsobení k většímu rozsahu klimatických podmínek a nižší požadavky na vodu a na hnojiva (2). V České republice se pro výrobu bioetanolu používá především cukrová řepa (vyrábí se také z kukuřice a zavažuje se i obnova závodu na produkci z obilí). V roce 2013 bylo pro výrobu bioetanolu spotřebováno 969 415 t technické cukrovky, ze které se vyrobilo 80 852 t bioetanolu, což je 77,4 % celkové produkce bioetanolu v České republice (3). Dle POLCARA ET AL. (4) ovlivňuje příznivě bioetanol v palivu i výfukové emise – při jeho spalování dochází ke snížení škodlivých výfukových plynů.

Obr. 1. Schéma geometrického uspořádání rotačního viskozimetru



Jelikož je v Evropské unii povinnost přimíchávat určitý podíl biosložky do konvenčních paliv – do roku 2020 má být v celé EU dosažen nejméně 10% podíl biopaliv na celkové spotřebě paliva v dopravě (5), je nutné sledovat, zda tento přírůstek nezmění fyzikální vlastnosti paliva. Zkoumáním tokových vlastností různých směsí bioetanolu a benzínu z hlediska kvality jeho rozprášení ve spalovacím prostoru je předmětem několika studií, např. (6) a (7). Autoři docházejí k závěrům, že při vstřikování ať už čistého bioetanolu, nebo jeho směsí s benzinem, nedochází k významným změnám v charakteristice vstříku, resp. v jeho tvaru a v jednotlivých fázích rozvoje rozprášení paliva. PARK ET AL. (6) navíc hodnotí atomizaci paliva po jeho vstříknutí. Při hodnocení velikosti kapek v určitých fázích vstříku došli autoři k závěru, že čistý bioetanol měl ze všech testovaných paliv největší kapky. Vyšší velikost kapek bioetanolu ve srovnání s benzinem přisuzují většímu povrchovému napětí a vyšší viskozitě. Tokovými vlastnostmi (kinematická viskozita a hustota) směsí bioetanolu a konvenčního benzínu se zabývali i KUMBÁR A DOSTÁL (8) a KUMBÁR A POLCAR (9), sledována však byla pouze dvě směsná paliva.

Materiál a metodika

K experimentům v tomto článku byl použit bioetanol vyrobený z cukrové řepy společností Tereos TTD (Dobruška). Bylo připraveno sedm vzorků s různou objemovou koncentrací bioetanolu v konvenčním benzinu (tab. I.), které byly dále zchlazeny na teplotu $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Poté byly pozvolna zahřívány do $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy byla sledována hustota a dynamická viskozita vzorků.

Ke sledování hustoty byl použit digitální hustoměr Densito 30 PX (Mettler Toledo, USA). Ke sledování dynamické

Tab. I. Specifikace jednotlivých vzorků

Označení vzorku	Podíl bioetanolu (% obj.)	Podíl benzínu (% obj.)
E0	0	100
E15	15	85
E25	25	75
E50	50	50
E75	75	25
E85	85	15
E100	100	0

viskozity byl použit rotační viskozimetr DV-3P (Anton Paar, Rakousko) s adaptérem pro měření nízko viskózních kapalin a koaxiálním uspořádáním válec–válec (obr. 1.) Z naměřených hodnot dynamické viskozity a hustoty lze vypočítat kinematická viskozita, která je více popisná pro teplotně závislé kapaliny (10):

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1),$$

kde ν je kinematická viskozita ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$),
 η je dynamická viskozita (Pa.s),
 ρ je hustota ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Dále je možno vypočítat hodnoty tekutosti, která je převrácenou hodnotou dynamické viskozity (11):

$$\varphi = \frac{1}{\eta} \quad (2),$$

kde φ je tekutost ($(\text{Pa} \cdot \text{s})^{-1}$), častěji ($\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$),
 η je dynamická viskozita (Pa.s).

Při známé rychlosti deformace (smykové rychlosti) je možno určit hodnoty smykového napětí podle vzta-
 hu (12):

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (3),$$

kde τ je smykové napětí (Pa),
 η je dynamická viskozita (Pa.s),
 $\dot{\gamma}$ je rychlost deformace (smyková rychlost) (s^{-1}).

Grafické a statistické vyhodnocení bylo zpracováno pomocí programu MATLAB (verze R2012a).

Výsledky a diskuze

Výsledné hodnoty fyzikálních a mechanických veličin jednotlivých vzorků jsou přehledně uvedeny v tab. II. Jedná se o hodnoty naměřené a dopočítané dle vztahů 1–3. Vybrané fyzikální veličiny byly stanovovány pro různé teploty směsí, a to od -10 °C do 40 °C s krokem 10 °C. Smykové napětí bylo stanovováno při konstantní rychlosti deformace (smykové rychlosti) $122,3 \text{ s}^{-1}$.

Naměřené hodnoty byly dále graficky zpracovány. Pro lepší přehlednost byly vytvořeny trojrozměrné grafy závislosti dynamické viskozity vzorků na teplotě a koncentraci bioetanolu v benzínu (obr. 2.) a závislosti hustoty vzorků na teplotě a koncentraci bioetanolu v benzínu (obr. 3.). V grafech na těchto obrázcích je teplota uváděna v Kelvinech.

Teplotní závislost dynamické viskozity jednotlivých vzorků byla dále matematicky modelována pomocí mocninné funkce (obr. 4.) dle vztahu 4, podobně jako v publikaci TRÁVNÍČKA ET AL. (13):

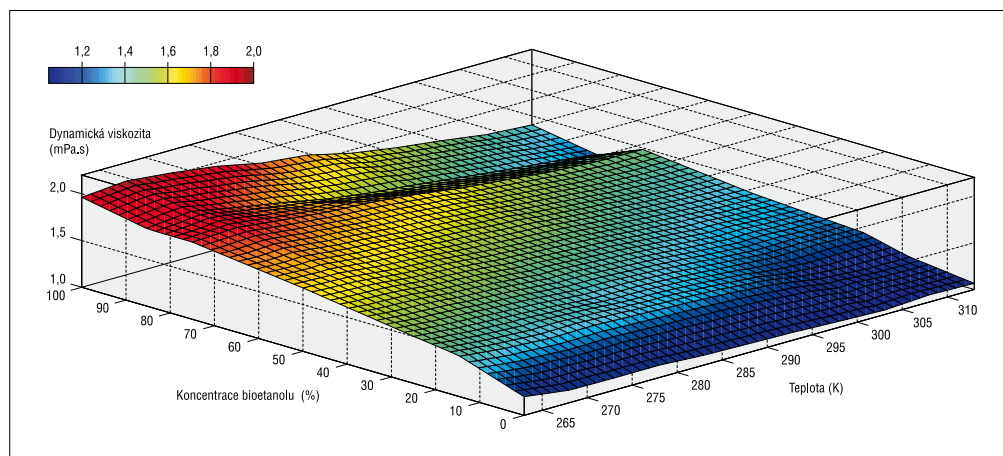
$$\eta = A \cdot T^b \quad (4),$$

kde η je dynamická viskozita (mPa.s),
 T je teplota (K),
 A, b jsou koeficienty.

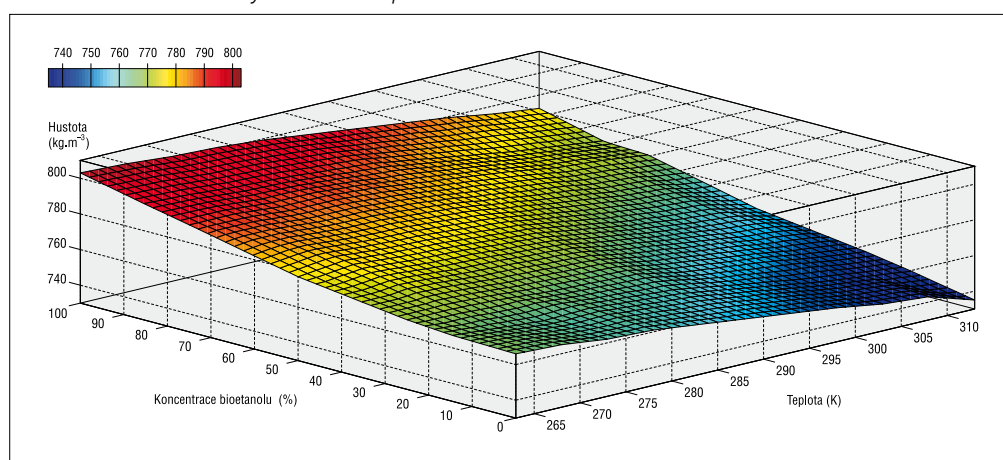
Tab. II. Hodnoty sledovaných fyzikálních veličin pro jednotlivé směsi

Vzorek	Teplota (°C)	Dynamická viskozita (mPa.s)	Hustota ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Kinematická viskozita ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	Tekutost ($\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Smykové napětí (Pa)
E0	-10	1,199	0,766	1,565	834,0	146,6
	0	1,130	0,762	1,483	885,0	138,2
	10	1,105	0,758	1,458	905,0	135,1
	20	1,083	0,752	1,440	923,4	132,5
	30	1,048	0,745	1,407	954,2	128,2
	40	1,066	0,735	1,450	938,1	130,4
E15	-10	1,440	0,767	1,877	694,4	176,1
	0	1,361	0,763	1,784	734,8	166,5
	10	1,350	0,762	1,772	740,7	165,1
	20	1,306	0,756	1,728	765,7	159,7
	30	1,188	0,748	1,588	841,8	145,3
	40	1,150	0,742	1,550	869,6	140,6
E25	-10	1,503	0,769	1,954	665,3	183,8
	0	1,435	0,768	1,868	696,9	175,5
	10	1,372	0,765	1,793	728,9	167,8
	20	1,343	0,759	1,769	744,6	164,2
	30	1,270	0,753	1,687	787,4	155,3
	40	1,265	0,746	1,696	790,5	154,7
E50	-10	1,678	0,777	2,160	595,9	205,2
	0	1,607	0,778	2,066	622,3	196,5
	10	1,530	0,775	1,974	653,6	187,1
	20	1,472	0,769	1,914	679,3	180,0
	30	1,389	0,762	1,823	719,9	169,9
	40	1,341	0,754	1,779	745,7	164,0
E75	-10	1,826	0,790	2,311	547,6	223,3
	0	1,793	0,788	2,275	557,7	219,3
	10	1,716	0,786	2,183	582,8	209,9
	20	1,599	0,780	2,050	625,4	195,6
	30	1,506	0,773	1,948	664,0	184,2
	40	1,472	0,768	1,917	679,3	180,0
E85	-10	1,827	0,795	2,298	547,3	223,4
	0	1,780	0,792	2,247	561,8	217,7
	10	1,601	0,789	2,029	624,6	195,8
	20	1,488	0,783	1,900	672,0	182,0
	30	1,377	0,775	1,777	726,2	168,4
	40	1,272	0,769	1,654	786,2	155,6
E100	-10	1,963	0,803	2,445	509,4	240,1
	0	1,955	0,800	2,444	511,5	239,1
	10	1,790	0,797	2,246	558,7	218,9
	20	1,627	0,791	2,057	614,6	199,0
	30	1,492	0,785	1,901	670,2	182,5
	40	1,391	0,778	1,788	718,9	170,1

Obr. 2. Závislost dynamické viskozity vzorků na teplotě a koncentraci bioetanolu v benzínu

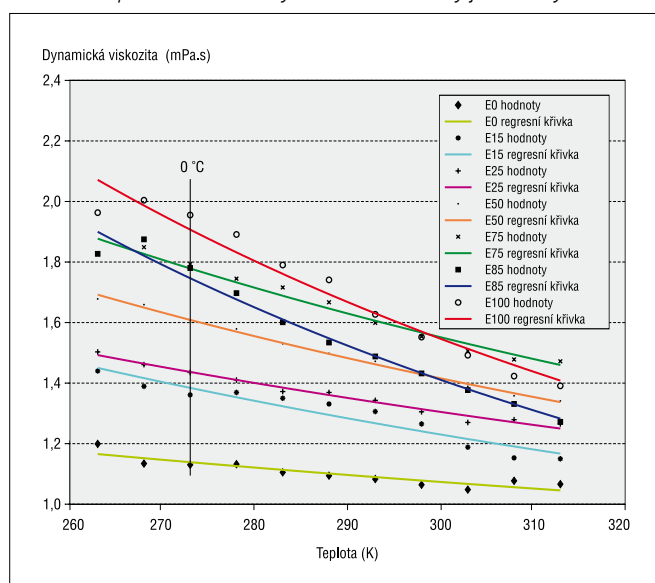


Obr. 3. Závislost hustoty vzorků na teplotě a na koncentraci bioetanolu v benzínu



Výsledné hodnoty koeficientů, koeficienty determinace a střední kvadratické chyby predikce pro jednotlivé mocninové funkce jsou uvedeny v tab. III.

Obr. 4. Teplotní závislost dynamické viskozity jednotlivých vzorků



Teplotní závislost hustoty jednotlivých vzorků byla dále matematicky modelována pomocí polynommické funkce 2. stupně (obr. 5.) dle vztahu 5, podobně jako v publikaci (8):

$$\rho = c_2 \cdot T^2 + c_1 \cdot T + c_0 \quad (5)$$

kde ρ je hustota ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$),
 T je teplota (K),
 c_i jsou koeficienty.

Výsledné hodnoty koeficientů, koeficienty determinace a střední kvadratické chyby predikce pro jednotlivé polynommické funkce 2. stupně jsou uvedeny v tab. IV.

Závěr

V Evropské unii je závazně stanovený cíl dosáhnout do roku 2020 v celé unii 10% podíl biopaliv na celkové spotřebě v dopravě (5). Toto je platná evropská směrnice, kterou se musí řídit všechny členské státy včetně České republiky. V oblasti konvenčních kapalných paliv se to řeší nejčastěji přimícháváním metylesteru řepkového oleje

do motorové nafty a bioetanolu do benzínu. Bioetanol je v České republice nejvíce vyráběn z cukrové řepy. Důležitým předpokladem míchání těchto složek je, že nebudou příliš změněny jejich tokové vlastnosti, resp. fyzikální a mechanické vlastnosti. Předmětem naší práce bylo stanovení dynamické viskozity, hustoty, kinematické viskozity, tekutosti a smykového napětí vzorků v závislosti na teplotě a koncentraci bioetanolu v benzínu.

Z výsledků je patrné, že s narůstající teplotou klesala dynamická viskozita, hustota, a tedy i kinematická viskozita a smykové

Tab. III. Hodnoty koeficientů (R^2 je koeficient determinace, RMSE je střední kvadratická chyba predikce)

Vzorek	A	b	R^2	RMSE
E0	37,87	-0,6247	0,8335	0,0187
E15	1 521	-1,248	0,9157	0,0302
E25	438,5	-1,020	0,9808	0,0119
E50	3 179	-1,353	0,9954	0,0084
E75	5 905	-1,445	0,9705	0,0255
E85	5,515e5	-2,257	0,9763	0,0337
E100	4,819e5	-2,218	0,9545	0,0510

Tab. IV. Hodnoty koeficientů (R^2 je koeficient determinace, RMSE je střední kvadratická chyba predikce)

Vzorek	c_2	c_1	c_0	R^2	RMSE
E0	-0,006713	3,278	368,2	0,9922	0,9802
E15	-0,008112	4,163	232,5	0,9866	1,1274
E25	-0,008205	4,243	221,1	0,9924	0,8067
E50	-0,009930	5,223	91,8	0,9844	1,2034
E75	-0,006480	3,262	381,0	0,9909	0,8541
E85	-0,006946	3,457	366,3	0,9940	0,7925
E100	-0,005874	2,871	454,5	0,9983	0,3997

tření jednotlivých vzorků. Tekutost naopak stoupala. S narůstající koncentrací bioetanolu v benzínu stoupaly sledované veličiny, kromě tekutosti, která klesala.

Pokles dynamické viskozity a hustoty se stoupající teplotou (od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $40\text{ }^{\circ}\text{C}$) byl dále pro jednotlivé vzorky modelován pomocí mocninné funkce pro dynamickou viskozitu a polynomicke funkce 2. stupně pro hustotu. Tyto matematické modely dosahovaly velmi vysokých přesností, což dokazují hodnoty koeficientu determinace a střední kvadratické chyby predikce.

Príspevek byl zpracován s podporou projektu TP 6/2015 „Rázové zatěžování zemědělských produktů a potravin“, financovaný interní grantovou agenturou AF MENDELU.

Souhrn

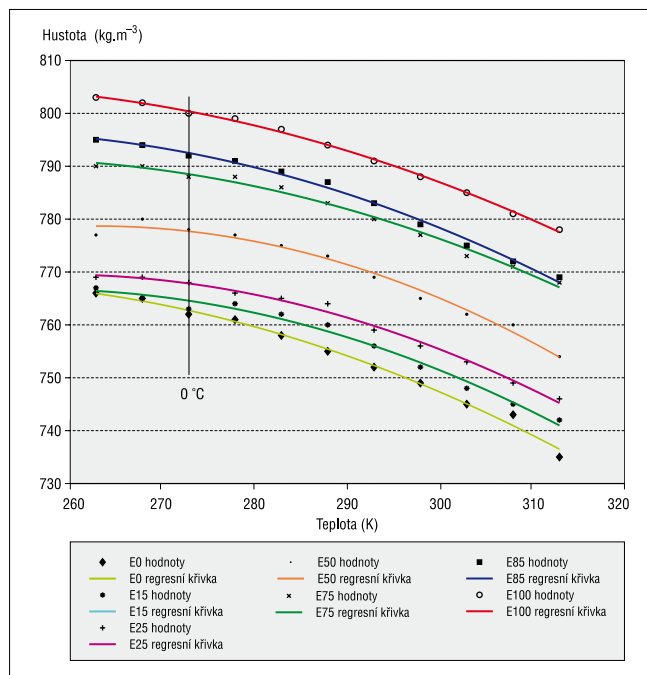
Hlavním cílem tohoto článku je popsat fyzikální a mechanické vlastnosti směsí bioetanolu a konvenčního benzínu. Bylo vytvořeno sedm vzorků s objemovou koncentrací bioetanolu 0 %, 15 %, 25 %, 50 %, 75 %, 85 % a 100 % v benzínu. U těchto vzorků byla sledována dynamická a kinematická viskozita, hustota, tekutost a smykové napětí v závislosti na teplotě. S narůstající teplotou klesala dynamická viskozita i hustota vzorků, resp. i kinematická viskozita a smykové napětí při konstantní smykové rychlosti. Tekutost vzorků zákonitě stoupala. Se zvyšujícím se podílem bioetanolu v benzínu stoupala dynamická viskozita i hustota vzorků, resp. i kinematická viskozita a smykové napětí při konstantní smykové rychlosti. Tekutost naopak klesala. Pokles dynamické viskozity a hustoty se stoupající teplotou byl dále pro jednotlivé vzorky modelován pomocí mocninné funkce (dynamická viskozita) a polynomicke funkce 2. stupně (hustota). Tyto matematické modely dosahovaly velmi vysokých přesností, což dokazují hodnoty koeficientu determinace a střední kvadratické chyby predikce. Modely mohou sloužit pro predikci fyzikálních a mechanických vlastností obdobných kapalin a směsí.

Klíčová slova: bioetanol, benzin, viskozita, hustota, koncentrace, teplota.

Literatura

- POLCAR, A.: *Analýza změn výstupních parametrů motorů při spalování paliva E85*. Brno, 2014, 144 s. Disertační práce na Ústavu techniky a automobilové dopravy AF MENDELU v Brně.
- BALAT, M.; BALAT, H.; ŌZ, C.: Progress in bioethanol processing. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, 2008, s. 551–573.
- JUREČKA, M. ET AL.: *Zemědělství 2013*. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2014, 134 s. ISBN 978-80-7434-151-9.

Obr. 4. Teplotní závislost hustoty jednotlivých vzorků



- POLCAR, A.; ČUPERA, J.; SEDLÁK, P.: Emise zážehového motoru při spalování paliva E85. *Listy cukrov. řepář.*, 130, 2014 (4), s. 149–153.
- HROMÁDKO, J.: Moderní poznatky v oblasti využití bioetanolu. *Listy cukrov. řepář.*, 130, 2014 (9–10), s. 323–327.
- PARK, S. H. ET AL.: Atomization and spray characteristics of bioethanol and bioethanol blended gasoline fuel injected through a direct injection gasoline injector. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30, 2009, s. 1183–1192.
- GAO, J.; JIANG, D.; HUANG, Z.: Spray properties of alternative fuels: A comparative analysis of ethanol-gasoline blends and gasoline. *Fuel*, 86, 2007, s. 1645–1650.
- KUMBÁR, V.; DOSTÁL, P.: Temperature dependence density and kinematic viscosity of petrol, bioethanol and their blends. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 51, 2014 (1), s. 175–179.



9. KUMBÁR, V.; POLCAR, A.: Flow behavior of petrol, bio-ethanol and their blends. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 60, 2012 (6), s. 211–216.
10. KUMBÁR, V.; POLCAR, A.; ČUPERA, J.: Rheological profiles of blends of the new and used motor oils. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 61, 2013 (1), s. 115–122.
11. HLAVÁČ, P.; BOŽIKOVÁ, M.: Influence of storing and temperature on rheologic and thermophysical properties of whisky samples. *Journal of Central European Agriculture*, 14, 2013 (3), s. 291–304.
12. KUMBÁR, V.; VOTAVA, J.: Differences in engine oil degradation in spark-ignition and compression-ignition engine. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 16, 2014 (4), s. 622–628.
13. TRÁVNÍČEK, P. ET AL.: Selected physical properties of liquid biofuels. *Research in Agricultural Engineering*, 59, 2013 (4), s. 121–127.

Kumbár V., Polcar A., Votava J.: Physical and Mechanical Properties of Bioethanol and Gasoline Blends

The main goal of this paper is a description of physical and mechanical properties of bioethanol and gasoline blends. Seven samples of blends were prepared with volume concentrations 0%, 15%, 25%, 50%, 75%, 85%, and 100% of bioethanol in gasoline. Temperature dependences of dynamic viscosity, kinematic viscosity, density, fluidity and shear stress of blends were observed. The samples' dynamic viscosity and density, resp. kinematic viscosity and shear stress (in constant shear rate) decreased with increasing temperature; naturally, their fluidity increased. With increasing concentration of bioethanol in gasoline, the dynamic viscosity and density, resp. kinematic viscosity and shear stress (in constant shear rate) increased as well; on the contrary, fluidity decreased. The decrease in dynamic viscosity and density was modelled using power law function (dynamic viscosity) and polynomial 2nd degree function (density). Mathematical models achieved high values of coefficients of determination and root mean squared error. The models can be used to predict physical and mechanical properties of similar liquids and blends.

Key words: bioethanol, gasoline, viscosity, density, concentration, temperature.

Kontaktní adresa – Contact address:

Ing. Vojtěch Kumbár, Ph.D., Mendelova univerzita, Agronomická fakulta, Ústav techniky a automobilové dopravy, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika, e-mail: vojtech.kumbar@mendelu.cz