

Vliv přidání bioetanolu do motorové nafty na vybrané parametry vznětového motoru

EFFECT OF ADDING BIOETHANOL INTO DIESEL ON SELECTED PARAMETERS OF THE COMPRESSION IGNITION ENGINE

Jan Hromádko – Česká zemědělská univerzita v Praze

Bioetanol je v dnešní době nejrozšířenějším biopalivem, jehož globální produkce každoročně roste. V roce 2014 jeho produkce dosáhla téměř 93 mld. l, přičemž největším výrobcem jsou Spojené státy americké, které vyprodukují přibližně 60 % světové produkce (přesně 54,126 mld. l ročně) (1).

V návaznosti na vzrůstající produkci bioetanolu se začínají hledat nové možnosti jeho využití. Příkladem je celosvětové rozšiřování využívání paliva E85, které se v dnešní době stalo relativně běžným palivem řady čerpacích stanic. Další možnosti se hledají ve zvyšování nízkoprocentuálního přídatku bioetanolu do automobilového benzínu. Tento trend je patrný v USA, kde v roce 2012 ve městě Lawrence byl zahájen prodej paliva E15 (2). V současné době je možné toto palivo pořídit u 130 čerpacích stanic v 19 státech USA (3).

Přestože je bioetanol svými parametry vhodným alternativním palivem pro automobilový benzín (4, 5), mohou jeho vzrůstající přídatky do automobilového benzínu přinášet některé problémy, a nelze tudíž očekávat další vzrůstající trend u nízkopodílových směsí. Problematika v rozšiřování paliva E85 je zase spojena s nutností pořízení speciálního vozidla schopného

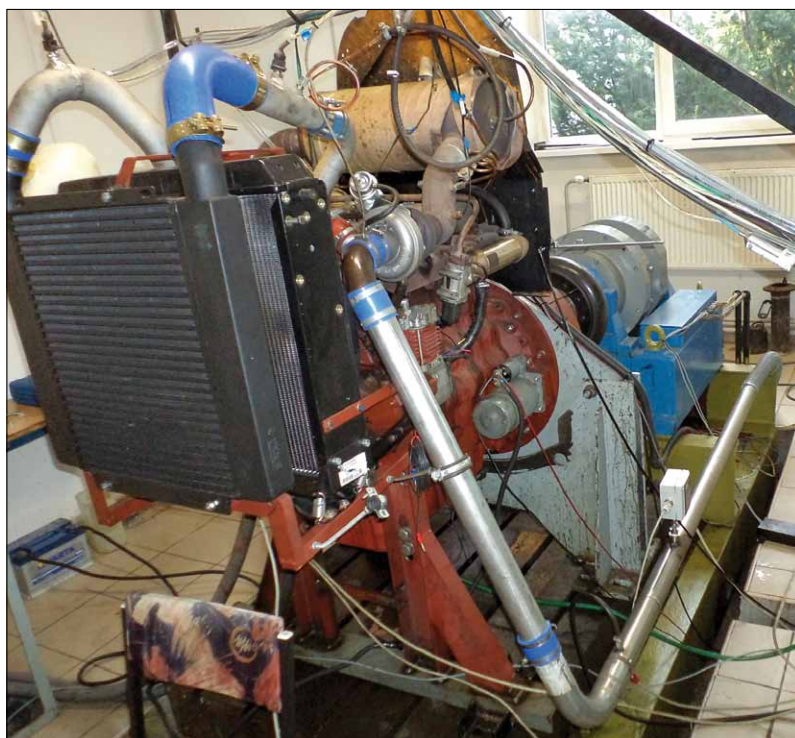
spalovat vysokoprocentní bioetanolové směsi (FFV), případně přestavbou vozidla, která jednak vyžaduje investiční náklad a také není vždy pro dané vozidlo zcela vhodné. Z tohoto pohledu taktéž nelze jednoduše předpokládat rychlé rozšíření dalšího využívání paliva E85.

Z výše uvedených informací je patrné, že se hledají další možnosti využívání bioetanolu jako paliva ve spalovacích motorech. Relativně rozsáhlou oblast nového využití bioetanolu představují vznětové motory, kde je, v důsledku rozdílných parametrů bioetanolu a motorové nafty, jeho využití podstatně komplikovanější než u zážehových motorů. Vzhledem k vysokému podílu kyslíku v bioetanolu je jeho využití ve vznětových motorech podporováno pozitivním dopadem kyslíkatých paliv na produkci škodlivých emisí a pevných částic (6).

První výzkum využití bioetanolu ve vznětových motorech probíhal ze sedmdesátých let minulého století v Jihoafrické republice. V osmdesátých letech bylo poté na tomto výzkumu pokračováno v Německu a ve Spojených státech amerických. Směs bioetanolu s motorovou naftou se jevila jako vhodné alternativní palivo pro traktory a lokomotivy (7).

Přímé přimíchání bioetanolu do motorové nafty je výrazně komplikováno problematiku mísitelnosti těchto paliv. Už při běžných teplotách (kolem 10 °C a nižších) dochází k separaci jednotlivých fází, stejným způsobem se projeví jakékoliv množství vody v bioetanolu. Separaci jednotlivých fází lze potlačit přidáváním kosolventů. Z hlediska

Obr. 1. Motorové zkušební stanoviště s motorem Zetor 1505



Tab. 1. Základní parametry motoru Z 1505

typ motoru	Z 1505
maximální výkon	90 kW
maximální točivý moment	525 Nm
počet válců	4
objem motoru	4 156 cm ³
vrtání	105 mm
zdvih	120 mm
kompresní poměr	17
jmenovité otáčky	2 200 ot.min ⁻¹
předvstřík paliva	9° před HÚ
pořadí vstříku	1 – 3 – 4 – 2
měrná spotřeba paliva	255 g.kWh ⁻¹

Tab. II. Produkce škodlivých emisí a spotřeba paliva při provozu na motorovou naftu

Bod	Váha	Předepsané		Skutečné			Emise				Spotřeba (kg.h ⁻¹)
		otáčky (min ⁻¹)	moment (Nm)	otáčky (min ⁻¹)	moment (Nm)	výkon (kW)	CO (g./h ⁻¹)	CO ₂ (kg.h ⁻¹)	NO _x (g.h ⁻¹)	HC (g.h ⁻¹)	
1	0,15	2 200	417,00	2 114,73	416,33	92,20	66,58	73,27	493,70	1,76	23,78
2	0,15		313,00	2 200,80	317,97	73,28	30,98	60,53	416,60	2,60	19,60
3	0,15		208,00	2 215,37	205,23	47,61	15,20	42,55	281,00	4,01	14,12
5	0,1		41,70	2 208,04	42,40	9,80	49,99	16,90	77,41	5,47	5,67
6	0,1	1 500	540,00	1 523,31	529,86	84,52	104,18	62,59	639,84	3,11	18,97
7	0,1		405,00	1 504,90	405,33	63,88	31,70	46,76	536,20	3,14	14,04
8	0,1		270,00	1 490,69	272,61	42,56	8,08	30,97	343,98	3,03	9,64
11	0,15	780	0,00	789,76	17,25	1,43	22,08	2,22	27,24	1,43	1,03
Souhrnná produkce škodlivých emisí a spotřeba paliva (g.kWh ⁻¹)							0,758	813,50	6,56	0,0564	260,49

teploty je nevhodnějším kosolventem etyl acetát (8) a z hlediska obsahu vody v bioetanolu TFT (tetrahydrofuran) (9). Další podstatný problém spojený s touto aplikací bioetanolu představuje pokles mazivostních parametrů směsného paliva, které omezuje vyšší přídatku bioetanolu přibližně do 20 %.

Pro řešení výše uvedených problémů byly hledány další možnosti ve využití bioetanolu ve vznětových motorech. Ty jsou ale na druhou stranu přinášen i řadu dalších problémů, představovaných převážně relativně velkými zásahy do konstrukce motoru. Jednou z možností jsou dvoupalivové systémy, kdy je bioetanol vstřikován odděleně od motorové nafty. Bioetanol může být jednak přiváděn před sací ventily pomocí nízkotlakého vstřikování (u starších systémů se bioetanol rozprašoval pomocí karburátorů), nebo také může být vstřikován oddělenými vstřikovači přímo do válce motoru. Vstřikování před sací ventily je spojeno s problémy předčasných zážehů při vysokých zatíženích a naopak vynecháním zážehů při nízkých zatíženích. Vysokotlaké vstřikování přímo do válce je spojeno s relativně velkými náklady na druhý vysokotlaký vstřikovací systém a umístění dalšího vstřikovače vyžaduje také většinou výměnu celé hlavy válců (10). Další možností je využití čistě bioetanolového paliva E95, které je složeno z 95 % bioetanolu a 5 % aditiv pro lepší vznícení. Vzhledem k problematickému vznícení bioetanolu je nutné změnit kompresní poměr. Bioetanol má také vzhledem k nízké výhřevnosti výrazně vyšší spotřebu a je nutné předělat palivovou soustavu motoru. Tato úprava je opět spojena s velkými zásahy do spalovacího motoru.

Z rozboru dané problematiky je patrné, že přímé přimíchání bioetanolu do motorové nafty, přes problematickou mísitelnost, mazivost, stabilitu paliva atd., představuje jednu z perspektivních možností využití bioetanolu ve vznětových motorech. Právě tato možnost využití bioetanolu byla zkoumána na Katedře vozidel a pozemní dopravy ČZU v Praze.

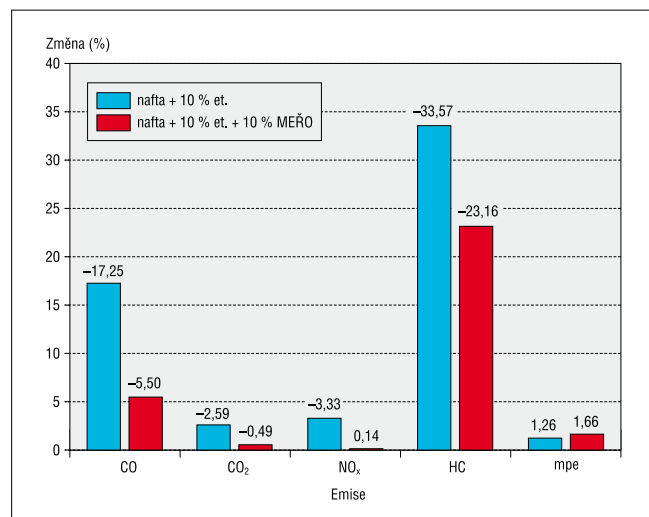
Materiál a metody

Měření vlivu přidání bioetanolu do motorové nafty bylo provedeno na traktorovém motoru Zetor 1505 umístěném na zkušební stanovišti. K zatěžování motoru byl použit modernizovaný

motorový dynamometr VD 250 o maximálním brzděném výkonu 250 kW. Pro definování zatěžovacího režimu motoru byl použit osmibodový test ISO 8178 C1, který je také označován jako Non-Road Steady Cycle (NRSC). Tento test definuje osm pracovních bodů motoru, v kterých probíhá měření spotřeby paliva, produkce škodlivých emisí, produkce pevných částic atd. K jednotlivým měřením bodům je dále přiřazen váhový faktor, pomocí kterého je stanovena výsledná měrná spotřeba paliva, produkce škodlivých emisí, produkce pevných částic atd. Non-Road Steady Cycle se využívá při homologaci nesilničních vozidel, zejména zemědělských traktorů.

Prvním měřeným palivem byla čistá motorová nafta, poté následovalo měření motorové nafty s přídatkem 10 % bioetanolu. Jako poslední palivo byla měřena motorová nafta s přídatkem 10 % bioetanolu a 10 % metylesteru řepkového oleje. Přidání metylesteru řepkového oleje bylo zvoleno z důvodu výrazného zlepšení mísitelnosti bioetanolu s motorovou naftou. Základní měřené parametry byly představovány škodlivými emisemi a spotřebou paliva. Měřený motor Zetor 1505 umístěný

Obr. 2. Změna souhrnné produkce škodlivých emisí a spotřeby paliva pro jednotlivá použitá paliva



Tab. III. Produkce škodlivých emisí a spotřeba paliva při provozu na motorovou naftu s 10 % bioetanolu

Bod	Váha	Předepsané		Skutečné			Emise				Spotřeba (kg.h ⁻¹)
		otáčky (min ⁻¹)	moment (Nm)	otáčky (min ⁻¹)	moment (Nm)	výkon (kW)	CO (g./h ⁻¹)	CO ₂ (kg.h ⁻¹)	NO _x (g.h ⁻¹)	HC (g.h ⁻¹)	
1	0,15	2 200	417,00	2 108,89	406,79	89,84	70,52	75,12	570,37	2,49	23,26
2	0,15		313,00	2 163,29	319,37	72,35	22,22	58,04	418,39	2,34	19,27
3	0,15		208,00	2 169,38	209,94	47,69	20,29	38,93	242,14	2,37	13,77
5	0,1		41,70	2 202,45	41,71	9,62	52,81	15,61	51,15	2,29	5,72
6	0,1	1 500	540,00	1 565,76	494,60	81,10	47,36	62,81	679,66	2,54	18,78
7	0,1		405,00	1 499,40	404,29	63,48	14,47	41,00	429,56	1,42	14,88
8	0,1		270,00	1 509,85	271,82	42,98	5,41	26,41	232,41	1,10	10,42
11	0,15	780	0,00	769,17	16,71	1,35	21,95	2,24	12,02	0,73	0,89
Souhrnná produkce škodlivých emisí a spotřeba paliva (g.kWh ⁻¹)							0,627	792,46	6,34	0,0375	263,78

na zkušební stanovišti je zobrazen na obr. 1., v tab. I. jsou pak uvedeny jeho základní parametry.

Vyhodnocení

Všechny měřené parametry byly zaznamenávány s frekvencí 1 Hz. Po nastavení pracovního bodu a po ustálení měřených parametrů se hodnoty zaznamenávaly po dobu šesti minut. Z těchto hodnot byla v programu Excel stanovena průměrná hodnota, která byla dále zpracovaná do výsledných tabulek (tab. II. až IV.). Tab. II. uvádí hmotnostní produkci základních složek škodlivých emisí a spotřebu paliva v jednotlivých měřených bodech a dále také výsledné měrné produkce škodlivých emisí a spotřebu paliva v celém cyklu ISO 8178 C1 při provozu na čistou motorovou naftu. Tab. III. uvádí stejné parametry při provozu na motorovou naftu s 10 % bioetanolu. Tab. IV. pak uvádí stejné hodnoty při provozu na motorovou naftu s 10 % bioetanolu a 10 % metylesteru řepkového oleje.

Obr. 2. znázorňuje procentuální změnu souhrnné produkce škodlivých emisí a spotřeby paliva pro jednotlivá použitá paliva. Za etalonovou hodnotu je považována produkce emisí a spotřeba paliva při použití motorové nafty. Kladné znaménko u znázorněné změny charakterizuje změnu k vyšší produkci či vyšší spotřebě paliva, záporné znaménko pak charakterizuje změnu opačným směrem.

Pozn.: Jelikož celý test ISO 8178 definuje 11 měřených bodů a varianta C1 určená zejména pro zemědělské traktory využívá pouze 8 bodů, nesou některé měřené body v tab. II. až tab. IV. označení čísla většími než 8 a na druhou stranu některá čísla chybí (4, 9, 10).

Závěr a diskuse

Obr. 2. ukazuje na pokles produkce oxidu uhelnatého pro obě alternativní paliva. V tomto konkrétním případě má větší přínos přimíchání pouze bioetanolu. Při kombinaci přidání bioetanolu s metylesterem řepkového oleje je pokles výrazně nižší. Pokles produkce oxidu uhelnatého uvádí i řada ostatních autorů

zabývajících se touto problematikou, např. RAKOPOULUS ET AL. (11) ARAPATKOS ET AL. (12) a ARMAS ET AL. (13). Podstatně méně autorů např. HEA ET AL. (14) uvádí mírný nárůst. Nejednoznačný výsledek uvádí LEBECKA ET AL. (15), který v některých bodech dosáhl mírného poklesu, v jiných bodech naopak dosáhl mírného nárůstu. Dosažení rozdílných výsledků v jednotlivých publikacích může být do jisté míry způsobeno použitou metodou měření, samotným typem motoru, výběrem měřených bodů atd.

Z obr. 2 je dále zřejmý mírný pokles přímé produkce oxidu uhličitého, který je však zanedbatelný v porovnání s poklesem během celého životního cyklu alternativního paliva. Paliva vzniklá zpracováním biomasy vykazují nulovou přímou změnu produkce oxidu uhličitého (během růstu rostliny spotřebují stejné množství oxidu uhličitého, jako vyprodukují při svém spálení), produkce oxidu uhličitého je tak dána pouze spotřebou fosilních paliv a energie nutné pro pěstování biomasy a výrobu biopaliva. Z tohoto důvodu řada ostatních autorů přímou změnu v produkci oxidu uhličitého nevyhodnocuje.

Mírný pokles produkce oxidů dusíku zaznamenaný při provozu na palivo obsahující 10 % bioetanolu může být způsoben nižší výhřevností bioetanolu. Tento předpoklad se však nepotvrzuje u varianty, kdy přidáme ještě metylester řepkového oleje. V tomto případě dojde k nárůstu produkce oxidů dusíku o 0,14 %. Obě tyto změny se pohybují na hranici přesnosti měření, nelze z nich tedy vyvodit relevantní závěr. Obdobně je tomu i u ostatních autorů, kde např. RAKOPOULUS ET AL. (11) uvádí mírný pokles, ARMAS ET AL. (13) naopak mírný nárůst a LEBECKA ET AL. (15) v některých bodech naměřil pokles, v jiných nárůst.

Relativně větší pokles v produkci nespálených uhlovodíků pro alternativní paliva může ukazovat na kladný přínos přidaného bioetanolu. Vzhledem k použité metodě měření emisí pomocí NDIR analyzátoru, který u nespálených uhlovodíků nedosahuje požadované přesnosti, nelze kladný přínos bioetanolu v tomto případě považovat za průkazný. Autoři ostatních publikací dosahují nejednoznačného výsledku, produkce nespálených uhlovodíků u nich také výrazně závisí na ostatních parametrech experimentů.

Nárůst v měrné spotřebě paliva zaznamenaný u obou alternativních paliv je způsobený nižší výhřevností přidaného bioetanolu a metylesteru řepkového oleje. Na nárůstu spotřeby paliva se shodují všichni zmínění autoři.

Tab. IV. Produkce škodlivých emisí a spotřeba paliva při provozu na motorovou naftu s 10 % bioetanolu a 10 % metylesteru řepkového oleje

Bod	Váha	Předepsané		Skutečné			Emise				Spotřeba (kg.h ⁻¹)
		otáčky (min ⁻¹)	moment (Nm)	otáčky (min ⁻¹)	moment (Nm)	výkon (kW)	CO (g./h ⁻¹)	CO ₂ (kg.h ⁻¹)	NO _x (g.h ⁻¹)	HC (g.h ⁻¹)	
1	0,15	2 200	417,00	2 134,43	399,49	89,29	49,80	70,86	488,89	0,16	23,44
2	0,15		313,00	2 197,00	311,55	71,68	22,54	58,40	423,69	3,31	19,43
3	0,15		208,00	2 202,27	206,07	47,53	21,78	41,98	299,58	2,50	13,99
5	0,1		41,70	2 198,63	43,16	9,94	65,54	17,38	87,13	4,00	5,82
6	0,1	1 500	540,00	1 528,25	488,60	78,19	64,00	58,31	591,81	1,14	17,98
7	0,1		405,00	1 512,56	405,48	64,23	37,49	46,71	495,79	2,87	14,72
8	0,1		270,00	1 501,73	269,57	42,39	16,64	30,38	315,21	4,10	10,07
11	0,15	780	0,00	781,50	23,61	1,93	27,27	2,35	28,16	0,70	0,85
Souhrnná produkce škodlivých emisí a spotřeba paliva (g.kWh ⁻¹)							0,717	809,52	6,56	0,0433	264,81

Výsledky dosažené v našem experimentu potvrzují teoretický předpoklad, že přidáním bioetanolu (paliva obsahujícího relativně vysoký podíl kyslíku) lze účinně snížit produkci oxidu uhelnatého a nespálených uhlovodíků, bez většího nárůstu produkce oxidů dusíku. Z provedeného rozboru ostatních publikací lze odvodit závěr, že většina autorů došla k poklesu produkce oxidu uhelnatého vlivem přidání bioetanolu do motorové nafty. U produkce nespálených uhlovodíků a oxidů dusíku již výsledky ostatních publikací nejsou tak jednoznačné. Souhrnně lze uvést, že se změna produkce základních škodlivých emisí vlivem přidání bioetanolu do motorové nafty může v konkrétních případech mírně lišit, avšak případná negativní změna nikdy nebude dosahovat dramatických hodnot, bránících provozu motoru na toto směsné palivo.

Autor článku děkuje projektům MEDETOX (Inovativní metody monitorování toxicity výfukových plynů v podmínkách reálného městského provozu, LIFE10 ENV/CZ/651) a BIOTOX – Mechanismy toxicity pevných částic z biopaliv (GAČR 13-0148S), v jejichž spolupráci byla naměřena vstupní data. Děkuje také doc. Michalu Vojtíškoví z ČVUT v Praze za konzultace v oblasti měření emisí. Konzultace proběhly v rámci projektu OPVK CZ.1.07/2.3.00/30.0034 „Podpora z kvalitnější týmů VaV a rozvoj intersektorální mobility“ na ČVUT v Praze.

Souhrn

Článek se zabývá změnou produkce škodlivých emisí a spotřeby paliva vlivem přímého přimíchání bioetanolu do motorové nafty. Výzkum v oblasti tohoto využití bioetanolu v dnešní době zaznamenává renesanci, zejména z důvodu rostoucí produkce bioetanolu a pozitivního dopadu bioetanolu na produkci škodlivých emisí. Zkoumána byla varianta přidání 10 % bioetanolu do motorové nafty a vzhledem k problematické mísitelnosti bioetanolu s motorovou naftou byl v druhé variantě experimentu spolu s bioetanolem přidán ještě metylester řepkového oleje ve stejné výši. Měření bylo provedeno na traktorovém motoru Zetor 1505 umístěném na zkušební stanovišti. Jako zatěžovací cyklus byl použit test ISO 8178 C1, který je také označován jako Non-Road Steady Cycle (NRSC) a slouží pro homologaci nesilničních vozidel.

Klíčová slova: bioetanol, motorová nafta, vznětový motor, škodlivé emise a spotřeba paliva.

Literatura

1. Renewable fuels association: World Fuel Ethanol Production. [online] <http://ethanolrfa.org/pages/World-Fuel-Ethanol-Production>.
2. Renewable fuels association: 2014 Ethanol Industry Outlook. Falling Walls & Rising Tides, [online] <http://www.ethanolrfa.org/page/-/rfa-association-site/Resource%20Center/2014%20Ethanol%20Industry%20Outlook.pdf?nocdn=1>.
3. Ethanol retailer: Help your customers with E15. [online] <http://www.ethanolretailer.com/e15-resource-center/>.
4. DEMIRBAS, A.: Progress and recent trends in biofuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33, 2007, s. 1–18.
5. AGARWAL, A. K.: Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33, 2007, s. 233–271.
6. RAKOPOULUS, C. D. ET AL.: Operational and environmental evaluation of diesel engines burning oxygen-enriched intake air or oxygen-enriched fuels: a review. [SAE Paper no. 2004-01-2924].
7. RAKOPOULUS, C. D. et al.: Multi-zone modeling of combustion and emissions formation in DI diesel engine operating on ethanol–diesel fuel blends. *Energy Conversion and Management*, 49, 2008, s. 625–643.
8. LETCHER, T. M.: Ternary liquid–liquid phase diagrams for diesel fuel blends. *South African Journal of Science*, 76, 1980, s. 130–132.
9. LETCHER, T. M.: Diesel blends for diesel engines. *South African Journal of Science*, 79, 1983, s. 4–7.
10. RAKOPOULUS, C. D.; ANTONOPOULUS, K. A.; RAKOPOULUS, D. C.: Experimental heat release analysis and emissions of a HSDI diesel engine fueled with ethanol–diesel fuel blends. *Energy*, 32, 2007, s. 1791–1808.
11. RAKOPOULUS, C. D. 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, s. 3155–3162.
12. ARAPATSAKOS, CH.: Application of diesel – ethanol mixtures in tractor engine. *International journal of energy and environment*, 3, 2009, s. 77–84.
13. ARMAS, O.; GARCÍA-CONTRERAS, R.; RAMOS, Á.: Pollutant emissions from New European Driving Cycle with ethanol and butanol diesel blends. *Fuel Processing Technology*, 122, 2014, s. 64–71.
14. HEA, B. ET AL.: The effect of ethanol blended diesel fuels on emissions from a diesel engine. *Atmospheric Environment*, 37, 2003, s. 4965–4971.

15. LEBECKAS, G.; SLAYINSKAS, S.; MAŽEIKA, M.: The effect of ethanol-diesel-biodiesel blends on combustion, performance and emissions of a direct injection diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 79, 2014, s. 698–720.

Hromádko J.: Effect of Adding Bioethanol into Diesel on Selected Parameters of Compression Ignition Engine

The article deals with the change of harmful emissions and fuel consumption due to direct addition of bioethanol into diesel. Research in the field of bioethanol use nowadays experiences renaissance, mainly as a result of rising production of bioethanol and its positive impact on the production of harmful emissions. The option of adding 10% of bioethanol into diesel was examined. Given the problematic miscibility of bioethanol with diesel fuel, the second variant of the experiment contained bioethanol and rapeseed oil methyl ester

in the same amount 10% each. Measurements were performed on the Zetor 1505 tractor engine at a test site. ISO 8178 C1 test was used as the load cycle; this test is also referred to as Non-Road Steady Cycle (NRSC) and is used for homologation of non-road vehicles.

Klíčová slova: bioethanol, diesel fuel, compression ignition engine, harmful emissions and fuel consumption.

Kontaktní adresa – Contact address:

Ing. Jan Hromádko, Ph.D., Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, Katedra vozidel a pozemní dopravy, Kamýcká 129, 165 21 Praha 6 – Suchbát, Česká republika, e-mail: janhromadko@tf.czu.cz