

Article citation info:

Chłopek Z, Jagiello S, Juwa S, Skrzek T. Comparative examination of performance characteristics of an IC engine fuelled with diesel oil and rape methyl esters. The Archives of Automotive Engineering- Archiwum Motoryzacji. 2016; 74(4):19-32, <http://dx.doi.org/10.14669/AM.VOL74.ART2>

COMPARATIVE EXAMINATION OF PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF AN IC ENGINE FUELLED WITH DIESEL OIL AND RAPE METHYL ESTERS

ZDZISŁAW CHŁOPEK¹, SEBASTIAN JAGIELLO², SEBASTIAN JUWA³, TOMASZ SKRZEK⁴

Warsaw University of Technology, University of Technology and Humanities in Radom

Summary

Results of comparative examination of the performance characteristics of a compression ignition (CI) engine fuelled with diesel oil and rape methyl esters (RME) have been presented. The engine performance characteristics were assessed from the point of view of energy (effective power and torque of the engine), economy (effective efficiency), and environmental impact (pollutant emission). At the tests, the admixture of summer and winter additives to the rape methyl esters was taken into account. The tests were carried out in the conditions of taking the full-load engine performance vs. engine speed on an AVL Single Cylinder Test Bed provided with a single-cylinder CI research engine AVL 5402, a set of exhaust gas analysers, and instrumentation to control the operation of the whole system. The measurement data were completed and analysed with the use of the AVL PUMA software. In result of the tests carried out, significant differences were found to exist between the engine performance characteristics obtained for the summer and winter versions of vegetable-oil methyl esters. Apart from this, the use of the biofuels under test was found to have a favourable impact on pollutant emission.

Keywords: internal combustion engines, rape methyl esters, pollutant emission, fuel consumption, effective power

¹ Warsaw University of Technology, Faculty of Automotive and Construction Machinery Engineering, Institute of Vehicles, ul. Narbutta 84, 02-791 Warszawa, Poland; e-mail: zchlopek@simr.pw.edu.pl

² Warsaw University of Technology, Faculty of Automotive and Construction Machinery Engineering, Institute of Vehicles, ul. Narbutta 84, 02-791 Warszawa, Poland; e-mail: jagiello.sebastian@gmail.com

³ Warsaw University of Technology, Faculty of Automotive and Construction Machinery Engineering, Institute of Vehicles, ul. Narbutta 84, 02-791 Warszawa, Poland; e-mail: sebastianjuwa@interia.pl

⁴ University of Technology and Humanities in Radom, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Operation and Maintenance of Machines and Vehicles, ul. Chrobrego 45, 26-600 Radom, Poland; e-mail: t.skrzek@uthrad.pl

1. Introduction

The search for unconventional fuels, different from the traditional petroleum-derivative fuels (motor spirits and diesel oils), especially for the powering of internal combustion (IC) engines, arises from both ecological and economic reasons. The factors most often mentioned as being important for environmental protection is pollutant emission, which include not only those harmful to human and animal health but also, for the fuels obtained from renewable energy sources, the avoided emission of fossil carbon dioxide in connection with the climate protection programs aimed at a reduction in the emission of this gas [10, 18]. The activities undertaken to pursue both the ecological and economic objectives include the searching for non-fossil fuels, which is also important for the protection of natural resources [10]. An economic and social aspect is the mobilization of the previously neglected communities and areas to provide raw materials suitable for the production of unconventional fuels [10, 18].

Among the unconventional fuels different from the traditional petroleum-derivative fuels, a special role is played by those referred to as "substitute fuels", i.e. the fuels that can be used in mass-produced spark ignition (SI) engines in place of motor spirits and in mass-produced CI engines in place of diesel oils [10]. It is a debatable issue whether substitute fuels are available at all. Normally, engine settings must be more or less radically changed for the use of unconventional fuels to be possible. Obviously, synthetic fuels can be provided with properties close to those of the conventional originals, but the synthetic fuels are now relatively expensive; apart from this, their potential as engine fuels usually cannot be fully utilized when they are modified to offer specific desirable characteristics.

Among the unconventional fuels being most popular at present and comparable with traditional petroleum-derivative fuels, those most closely related to the category of substitute fuels are the ones that are based on esters of biological oils [1, 6–9, 11–24, 26–30].

This article covers tests carried out on the following commercial fuels:

- traditional diesel oil ORLEN VERVA,
- self-contained biofuel B100 with a summer additive, denoted by RME – S (RME – Rape Methyl Ester),
- self-contained biofuel B100 with a winter additive, denoted by RME – W.

The tests were chiefly carried out to assess whether, and to what extent, the biofuels RME – S and RME – W may be considered as fuels substitute for the diesel oil.

The examination of the properties of CI engines fuelled with biological oil esters has a long tradition. The idea of using fuels of biological origin, in its essence, is by no means new. Just the opposite, the first fuels used by humans were of biological origin. The first documented evidences of the use of fire by humans date back to 300000 years ago and they were found at Zhoukoudian in China, where *Homo Erectus Pekinensis* (Peking Man) used wood as a fuel [25].

The idea of using fuels of biological origin for the powering of engines is very old, too. Fuels of biological origin, such as alcohols, vegetable oils, and biogas, were used to power even

the first IC engines. In historical terms, the first documented report of using fuels of biological origin for the powering of compression ignition engines has been included in the patent description by Rudolf Christian Karl Diesel of 1892, where the inventor wrote that although the use of vegetable oil as a fuel was at that time an issue of insignificant importance but it was possible that fuels of that kind would gain importance over the course of the years, as it was then in the case of coal- and petroleum-derivative fuels [28].

The literature related to the use of vegetable oil esters for the fuelling of CI engines deals with, above all, the following:

- ecological properties of the engines in terms of pollutant emission [1, 6–24, 26–30],
- energy characteristics of the engines in terms of effective power and torque [1, 6–24, 26–30],
- economic properties of the engines in terms of specific brake fuel consumption, effective efficiency [1, 6–24, 26–30] and, for vehicles, operational fuel consumption [7–9, 28],
- operational properties of the engines in terms of engine reliability, wear of engine components and, above all, engine startability at low temperatures [28],
- properties of the process of combustion of biological oil esters in CI engines [1, 11, 12, 14, 17, 20, 22, 23, 26],
- methods of the production of engine fuels from biological oils of various origins [28].

The properties of IC engines powered with biofuels are the subject matter of, *inter alia*, monographs [22, 28] and doctoral dissertations [14, 20, 23]. Thorough works have been devoted to the powering of engines with both self-contained fuels [1, 6–24, 26–29] and mixtures of biological oil esters with diesel oil [1, 7–9, 11, 14, 15, 19–24, 26–30]. Some of the works have been dedicated to the results of investigations on the process of biofuel combustion in engines [1, 11, 12, 14, 16, 20, 22, 23, 26].

In most cases, the conclusions appearing in the literature reports may be summarized as follows:

1. The use of vegetable oil esters as engine fuels brings about small reductions in carbon monoxide and hydrocarbon emission and a big reduction in the emission of particulate matter [1, 6–24, 26–30]. Simultaneously, many of the publications inform about an increase in the emission of nitrogen oxides, with significant differences in this field being reported: this growth ranged from 10% to 30%.
2. The fuelling of automotive CI engines with rape methyl esters results in an increase in the operational fuel consumption and the relative growth is about 10% [7–9].
3. The use of vegetable oil esters involves some operational problems, in particular a growth of bacterial flora in engine fuelling systems [28] and deterioration in engine startability at low temperatures, chiefly due to high viscosity of vegetable oil esters under cold conditions [28].
4. Vegetable oil esters have been found to have an aggressive chemical impact on some materials, both metallic and, in particular, non-metallic, used in IC engines, especially in their fuelling systems [28].

5. The research on the combustion process in cylinders of IC engines has chiefly highlighted differences in the autoignition delay time and in the pressure growth rate in the case of biofuels being used [1, 11, 12, 14, 16, 20, 22, 23, 26]. Usually, a trend is observed towards a reduction in the autoignition delay time and in the pressure growth rate for biofuels compared with diesel oil [1, 11, 12, 14, 16, 20, 22, 23, 26].

2. Empirical engine tests

The comparative examination of performance characteristics of an IC engine fuelled with diesel oil and rape methyl esters was carried out at the University of Technology and Humanities in Radom, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Operation and Maintenance of Machines and Vehicles, Department of Automotive Vehicles and Engines, within the student's graduation work carried out by Sebastian Jagiełło and Sebastian Juwa under the supervision of Prof. Zdzisław Chłopek, PhD. Eng.

The tests were carried out on an AVL Single Cylinder Test Bed [5] provided with a single-cylinder CI research engine AVL 5402 [3], a set of exhaust gas analysers, and instrumentation to control the operation of the whole system. The measurement data were completed and analysed with the use of the AVL PUMA software [4].

The basic technical characteristics of the AVL 5402 engine have been given in the table below.

Table. Basic technical characteristics of the AVL 5402 engine

Number of cylinders	1
Bore	85.01 mm
Stroke	90.00 mm
Displacement	511.00 cm ³
Combustion type	Compression ignition
Valve system	4 valves
Compression ratio	17.0 ÷ 17.5
Fuelling system	Direct injection, single injector, Common Rail system
Maximum effective power, without supercharging	6 kW
Maximum effective power, with supercharging	16 kW
Rated engine speed	4200 min ⁻¹
Injection pressure	180 MPa

Thanks to the use of special cylinder head gaskets, the compression ratio of the AVL 5402 engine could be changed. Special openings in the cylinder head made it possible to insert cameras into the combustion chamber and to observe the air-fuel mixture combustion process. The engine was provided with an exhaust gas recirculation (EGR) system and

sensors making it possible to measure, *inter alia*, the internal pressure in the combustion chamber and the temperature of exhaust gases. Special fuel injection equipment with associated software provided a possibility of modifying the engine fuelling algorithm.

The research facility AVL Single Cylinder Test Bed was equipped with a water-cooled eddy-current dynamometer AVL DP80 to apply external load to the research engine and an electric motor to start and drive, if necessary, the research engine, as well as pumps and heat exchangers to circulate the cooling liquid and to maintain the temperature of system components at the required level.

The test program included engine operation in static states in the conditions of taking the full-load engine performance vs. engine speed, with the engine speed being changed within the range of $(1200 \div 3600) \text{ min}^{-1}$ in 400 min^{-1} intervals. During the tests, primarily the following quantities were measured:

- engine speed – n ,
- engine torque – M_e ,
- mass consumption intensity of fuel – G_f ,
- mass consumption intensity of air – G_a ,
- carbon monoxide concentration in exhaust gases – c_{CO} ,
- hydrocarbon concentration in exhaust gases – c_{HC} ,
- nitrogen oxides concentration in exhaust gasses – c_{NOx} ,
- particulate matter concentration in exhaust gases – c_{PM} ,
- indicated pressure – p_g recorded in the domain of crankshaft rotation angle – α ,
- exhaust gas temperature – T_{ex} .

The measuring apparatus used for the tests was in conformity with the requirements of the following normative documents: Directive 1999/96/EC of the European Parliament and of the Council of 13 December 1999, Regulation (EC) No. 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007, and Commission Regulation (EC) No. 692/2008 of 18 July 2008.

In this article, the authors limited themselves to presenting only the results related to the energy, economic, and ecological properties of the engine, without showing the results of an analysis of the combustion process (because of the limited publication size).

Figures 1–6 show comparisons of the following basic characteristics of the fuels:

- elementary composition, i.e. mass content of carbon – u_C , hydrogen – u_H , and oxygen – u_O ,
- calorific value – W_f ,
- density – ρ ,
- cetane number – LC ,
- kinematic viscosity at a temperature of $40 \text{ }^\circ\text{C}$ – ν ,
- cold filter plugging point – t_b .

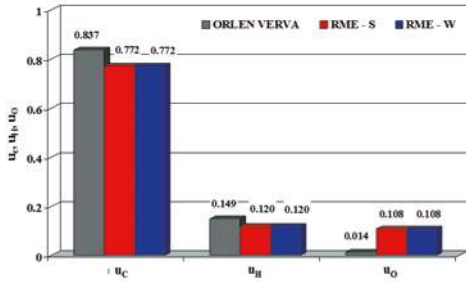


Fig. 1. Elementary composition of the fuels, i.e. mass content of carbon – u_C , hydrogen – u_H , and oxygen – u_O

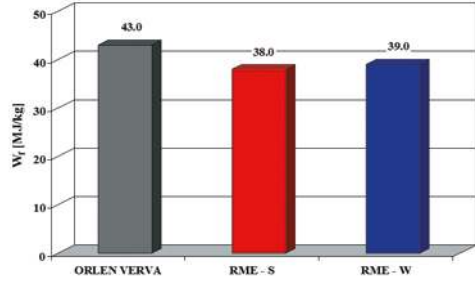


Fig. 2. Calorific value of the fuels – W_f

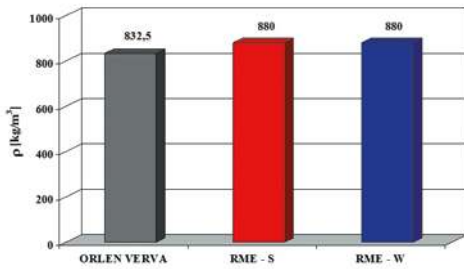


Fig. 3. Density of the fuels – ρ

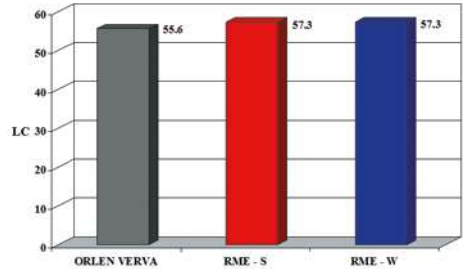


Fig. 4. Cetane number of the fuels – LC

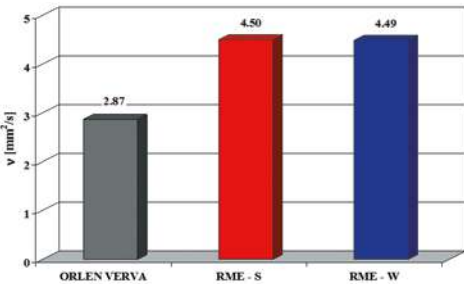


Fig. 5. Kinematic viscosity of the fuels at 40 °C – ν

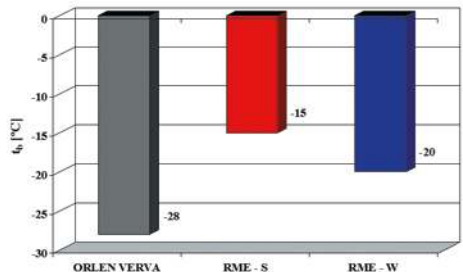


Fig. 6. Cold filter plugging point of the fuels – t_b

The mass content of oxygen in biofuels is much higher than the oxygen content of diesel oil, almost by an order of magnitude; therefore, the calorific value of the RME fuels is lower by over 10% in comparison with that of diesel oil. The density of the RME fuels exceeds that of diesel oil by about 6%; on the other hand, the RME fuels have better autoignition quality: their cetane number is higher by about 1.7. The RME fuels compared with diesel oil show much higher kinematic viscosity at 40 °C (by almost 60%). Significant differences were observed in the values of the cold filter plugging point: the biofuels, especially their summer version (RME – S), are definitely inferior to diesel oil in this respect.

Figures 7–12 shows engine performance vs. engine speed for the following basic quantities:

- energy characteristics, i.e. torque – M_e and effective power – N_e ,
- economic characteristics in terms of fuel consumption, i.e. effective efficiency – η_e ,
- exhaust gas temperature – T_{ex} ,
- ecological properties in terms of pollutant emission:
 - concentrations of substances harmful to human and animal health in engine exhaust gases, i.e. volume concentrations of carbon monoxide – c_{CO} , hydrocarbons – c_{HC} and nitrogen oxides – c_{NOx} and mass concentration of particulate matter – c_{PM} ,
 - specific brake emission of the pollutants mentioned above, i.e. carbon monoxide – e_{CO} , hydrocarbons – e_{HC} , nitrogen oxides – e_{NOx} , and particulate matter – e_{PM} .

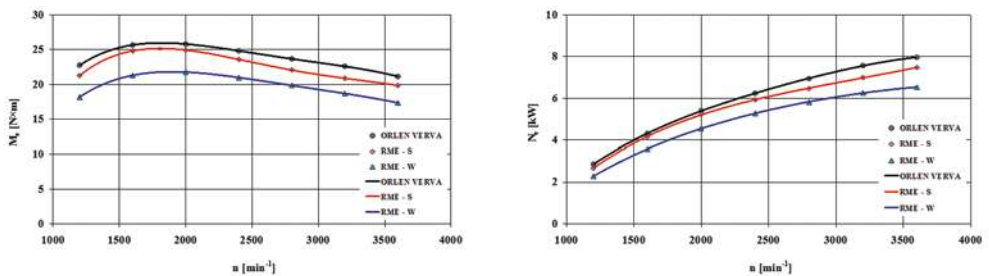


Fig. 7. Engine torque – M_e and effective power – N_e vs. engine speed – n

Due to lower calorific value of biofuels, both the torque and effective power of the engine fed with the RME fuels were lower than the corresponding values obtained for the engine fuelled with diesel oil; however, the difference observed for the summer fuel was quite small, which can be explained by higher effective efficiency of the engine powered with the RME - S fuel in comparison with the same engine powered with the RME - W fuel. The maximum engine torque and effective power values were achieved at engine speed of about 1600 min⁻¹ and of 3600 min⁻¹, respectively.

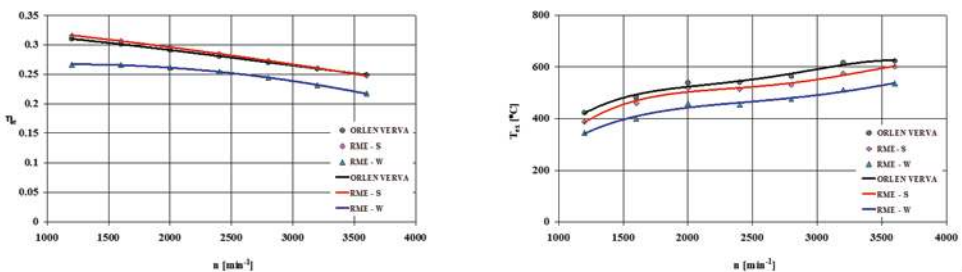


Fig. 8. Effective efficiency – η_e and exhaust gas temperature – T_{ex} vs. engine speed – n

The effective efficiency curves plotted for the engine fed with diesel oil and summer biofuel were close to each other while for the RME – W fuel, the effective efficiency of the engine was markedly lower. The exhaust gas temperature was highest for diesel oil, which was a consequence of higher calorific value of this fuel in comparison with the calorific values of the fuels under test, although the high temperature of combustion of such fuels, conducive to high emission of nitrogen oxides, is usually explained by the molecular proximity of oxygen to carbon and hydrogen, as it is in the case of oil esters [6–9, 13, 14, 17–22, 27, 28, 30].

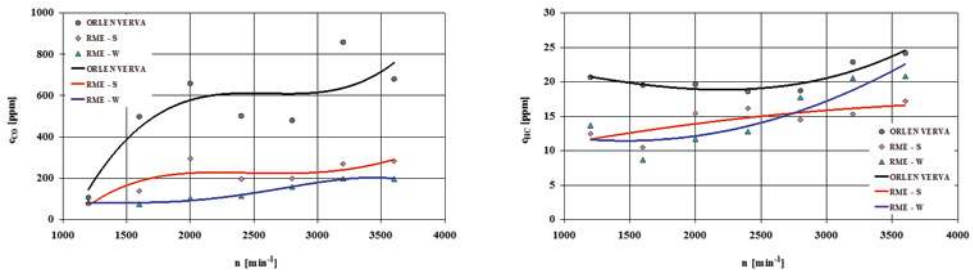


Fig. 9. Volume concentration of carbon monoxide – c_{CO} and hydrocarbons – c_{HC} vs. engine speed – n

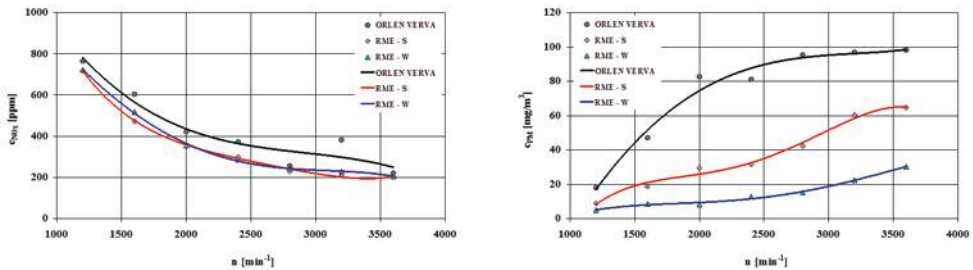


Fig. 10. Volume concentration of nitrogen oxides – c_{NOx} and mass concentration of particulate matter – c_{PM} vs. engine speed – n

The pollutant concentration vs. engine speed show in some cases considerable irregularity; however, a steady trend can be seen that for the biofuels, the concentrations of carbon monoxide and particulate matter were markedly lower, the hydrocarbon concentration was also lower but to a smaller extent, and (which does not confirm many experiment results [6–9, 13, 14, 17–22, 27, 28, 30]) the concentration of nitrogen oxides not only did not increase but even slightly declined.

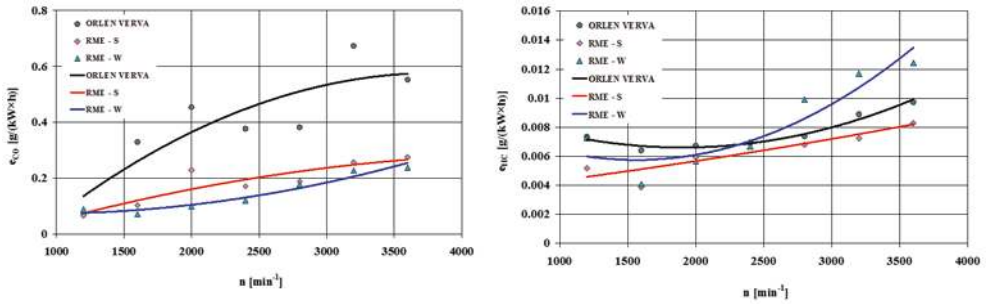


Fig. 11. Specific brake emission of carbon monoxide – e_{CO} and hydrocarbons – e_{HC} vs. engine speed – n

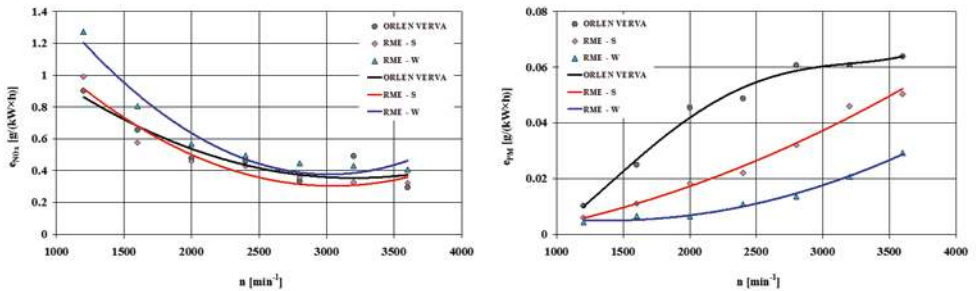


Fig. 12. Specific brake emission of nitrogen oxides – e_{NOx} and particulate matter – e_{PM} vs. engine speed – n

The specific brake emission of carbon monoxide and particulate matter were markedly lower for biofuels. For hydrocarbons and nitrogen oxides, the specific brake emission values were similar for all the fuels under test.

Figures 13 and 14 show the average values of the specific brake pollutant emission for individual fuels under test, determined in the engine speed domain.

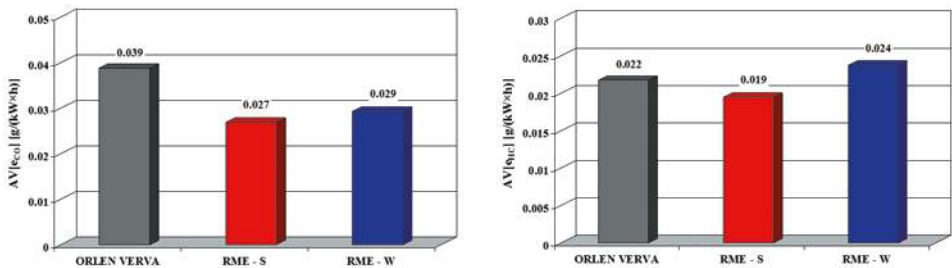


Fig. 13. Average values of the specific brake emission of carbon monoxide – $AV[e_{CO}]$ and hydrocarbons – $AV[e_{HC}]$, determined in the engine speed domain

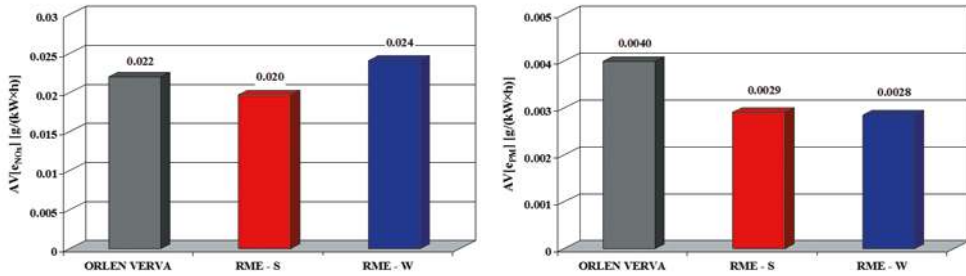


Fig. 14. Average values of the specific brake emission of nitrogen oxides – $AV[e_{NOx}]$ and particulate matter – $AV[e_{PM}]$, determined in the engine speed domain

Similarly to what was previously stated, it was also in the case of the average values of the specific brake pollutant emission for individual fuels under test, determined in the engine speed domain, that the biggest differences were observed for carbon monoxide and particulate matter. For the carbon monoxide and particulate matter emission, the lowest values were recorded in the case of the RME – S and RME – W fuels, respectively.

Figures 15 and 16 show relative changes – δ in the average values of the specific brake pollutant emission, determined in the engine speed domain.

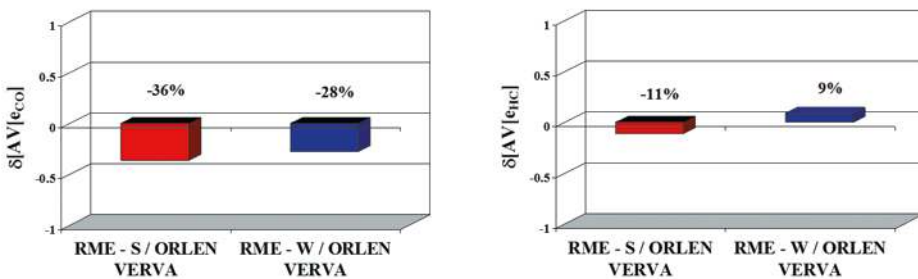


Fig. 15. Relative changes – δ in the average values – AV of the specific brake emission of carbon monoxide – e_{CO} and hydrocarbons – e_{HC} , determined in the engine speed domain

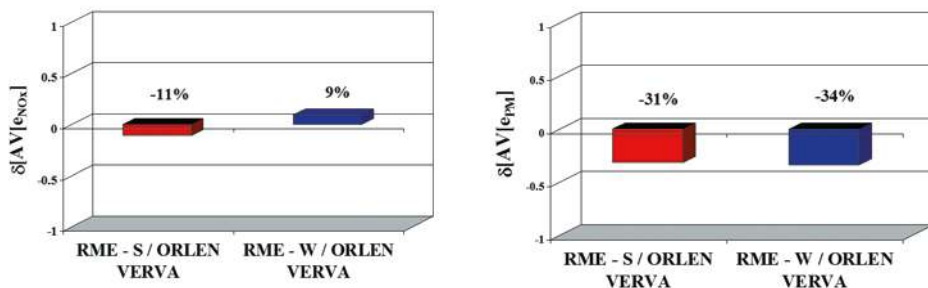


Fig. 16. Relative changes – δ in the average values – AV of the specific brake emission of nitrogen oxides – e_{NOx} and particulate matter – e_{PM} determined in the engine speed domain

The use of biofuels caused relative reductions in the average values of the specific brake emission of carbon monoxide and particulate matter, determined in the engine speed domain, by about 30%. For hydrocarbons and nitrogen oxides, these relative differences amounted to approximately 10%. For the RME – S fuel, the difference meant a reduction in the specific brake pollutant emission, while for the RME – W fuel, the specific brake pollutant emission increased.

3. Conclusions

The results of the tests carried out make it possible to draw the following conclusions:

1. The highest effective power and output torque of an internal combustion (IC) engine were obtained when the engine was fed with diesel oil. For the summer biofuel, they were somewhat lower; when the winter biofuel was used, the effective power and torque values were considerably reduced.
2. The use of methyl esters of rape oil (RME) resulted in a measurable reduction (by about 30%) in the emission of carbon monoxide and particulate matter. For hydrocarbons and nitrogen oxides, the relative difference was about 10% and meant a reduction in the specific brake emission for the summer (S) biofuel and an increase in the emission for the winter (W) biofuel. The result obtained for the nitrogen oxides emission was ambiguous, the more so that the temperature of exhaust gases was highest for diesel oil, somewhat lower for the RME – S fuel, and much lower for the RME – W fuel.
3. The effective efficiency of the IC engine was found to be at a similar level when the engine was fed with diesel oil and summer biofuel. For winter biofuel, the effective efficiency of the engine was markedly lower.

In general terms, a statement may be made that the relatively small differences in the assessed performance characteristics of the IC engine fuelled with diesel oil and rape

methyl esters provide grounds for presenting a cautious opinion that, based on the tests carried out, rape methyl esters with summer and winter additives may be recognized as substitute fuels for diesel oil. To make a more thorough assessment of the usability of rape methyl esters as substitute fuels for diesel oil, investigations should be carried out on the combustion process that takes place in the engine cylinder.

Acknowledgements

The authors being employees of the Warsaw University of Technology would like to express their thanks to the authorities and staff of the University of Technology and Humanities in Radom, and especially to Prof. Sławomir Luft, PhD. Eng., Director of the Institute of Operation and Maintenance of Machines and Vehicles and Head of the Department of Automotive Vehicles and Engines, and to Mr. Tomasz Skrzek, D. Eng., a member of the Department staff, for making it possible for the students doing their graduation work to carry out the tests described herein. These words of gratitude are also addressed to Mr. Grzegorz Pawlak, D. Eng., a member of the staff of the Department of Automotive Vehicles and Engines of the Institute of Operation and Maintenance of Machines and Vehicles at the Faculty of Mechanical Engineering of the University of Technology and Humanities in Radom and a member of the staff of the Department of Combustion Engines of the Institute of Vehicles at the Faculty of Automotive and Construction Machinery Engineering of the Warsaw University of Technology, who was involved in the organizational work related to these tests.

The full text of the Article is available in Polish online on the website <http://archiwummotoryzacji.pl>.

Tekst artykułu w polskiej wersji językowej dostępny jest na stronie <http://archiwummotoryzacji.pl>.

References

- [1] Ambrozik A, Orliński P, Orliński S. Influence of diesel engine fuelling with different fuels on self-ignition delay in aspect of ecology. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 2003; 3: 50-55.
- [2] AVL: GCA gas exchange and combustion analysis – User's guide.
- [3] AVL: Product description. Single cylinder research engine.
- [4] AVL: PUMA open automation platform. Available from: <https://www.avl.com/-/avl-puma-open-automation-platform>. [cited 2015 Jul 11].
- [5] AVL: Testing solutions. Measure and control. Single cylinder research engines & compact test bed.
- [6] Chłopek Z. et al.: Research of the influence non-conventional fuels on the pollutant emission from an engine to a generating set. IV International Congress of Internal Engines. Radom 2011.
- [7] Chłopek Z, Bardziński W, Jarczewski M, Sar H. Influence of fatty acid methyl esters' additive to diesel engine on ecology, fuel consumption and vehicle's performance. *Journal of KONES*. 2006; 1: 261-268.
- [8] Chłopek Z, Bardziński W, Jarczewski M, Sar H. Emission of pollution from engine powered by the fuel with additive of methyl ester of rape oil in dynamic tests. *Journal of KONES*. 2005: 63-70.

- [9] Chłopek Z, Bardziński W, Jarczewski M, Sar H. Influence of adding fatty acid methyl esters to the diesel fuel on pollutants emission from diesel engine in dynamic road test cycles. International Congress on Combustion Engines. Szczyrk 2005.
- [10] Chłopek Z. Ekologiczne aspekty motoryzacji i bezpieczeństwo ruchu drogowego. Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2012.
- [11] Chuepeng S, et al. A study of quantitative impact on emissions of high proportion RME based biodiesel blends. SAE 2007-01-0072.
- [12] Crookes R J, Korakianitis T, Namasivayam A M. A systematic experimental assessment of the use of rapeseed methyl ester (RME) as a compression ignition engine fuel during conventional and dual-fuel operation. TAE 7th International Colloquium on Fuels. Stuttgart. 2009.
- [13] Czerwinski J et al. Influences of alternative fuels GTL, RME & ROR on combustion and emissions of a modern HD-diesel engine. Verbrennungsforschung in der Schweiz, BfE Tagung, ETHZ 2009.
- [14] Hopp M. Untersuchung des Einspritzverhaltens und des thermischen Motorprozesses bei Verwendung von Rapsöl und Rapsmethylester in einem Common-Rail-Dieselmotor. Dissertation. Universität Rostock, 2005.
Available from: https://www.avl.com/combustion-measurement1/-/asset_publisher/gYjUpY19vEA8/content/single-cylinder-research-engines-compact-test-bed. [cited 2015.07.11].
<https://www.avl.com/documents/10138//885965//AVL+SCRE+ProductDescription+eng+2014.pdf>. (2015.07.11).
- [15] Kowalewicz A. Eco-diesel engine fuelled with rapeseed oil methyl ester and ethanol. Part 3: combustion processes. Proc. IMechE, Part D: J. Automobile Engineering. 2006; 220: 1283-1291.
- [16] Labeckas G, Slavinskis S. The effect of rapeseed oil methyl ester on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions. Energy Conversion and Management. 2006; 47: 1954-1967.
- [17] Mamat R et al. Effect of air intake pressure drop on performance and emissions of a diesel engine operating with biodiesel and ultra low sulphur diesel (ULSD). International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREQP'09). Valencia (Spain). 2009.
- [18] Marecka-Chłopek E, Chłopek Z. Eksploatacyjne aspekty zastosowania paliw pochodzenia biologicznego do zasilania silników spalinowych. (Operation aspects of biofuels use to supply of internal combustion engines). Transport Samochodowy. 2007; 4: 59-76.
- [19] Mayer A C R, Czerwinski J, Wyser M. Impact of RME/Diesel Blends on Particle Formation, Particle Filtration and PAH Emissions. SAE 2005-01-1728.
- [20] Namasivayam A M. Combustion: Performance and emissions characteristics of compression-ignition engines fuelled by sustainable fuels. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy to the University of London. School of Engineering and Materials Science Queen Mary University of London. 2011.
- [21] Nwafor O M I. Emission characteristics of diesel engine operating on rapeseed methyl ester. Renewable Energy. 2004; 29: 119-129.
- [22] Orliński P. Wybrane zagadnienia procesu spalania paliw pochodzenia roślinnego w silnikach o zapłonie samoczynnym (Selected issues of the combustion of vegetable-derivative fuels in compression ignition engines). Instytut Naukowo-Wydawniczy „SPATIUM”. Radom 2013.
- [23] Rounce P L. Engine performance and particulate matter speciation for compression ignition engines powered by a range of fossil and biofuels. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. The University of Birmingham. School of Engineering. 2011.
- [24] Ruan D F, Cheng W L, Lee C F. Comparison of performance and combustion characteristics of diesel fuel and vegetable oils in diesel engine. 2008 SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress. Shanghai, China. 2008.
- [25] Sautman B. Peking man and the politics of paleoanthropological nationalism in China. The Journal of Asian Studies. 2001; 60(1): 95-124.
- [26] Scholz C, Stary P. Experimental study of common rail injection diesel engine fuelled with RME and diesel fuel. XLII International Scientific Conference of Czech and Slovak University Departments and Institutions Dealing with the Research of Combustion Engines. Žilina, Slovakia, 2011.
- [27] Stępień Z et al. Research on emissions and engine lube oil deterioration of diesel engines with biofuels (RME). SAE 2011-01-1302.

- [28] Szlachta Z. Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami rzepakowymi (Feeding of compression ignition engines with rape fuels). WKŁ. Warszawa 2002.
- [29] Wellguth G. Performance of vegetable oils and their monoesters as fuels for diesel engines. SAE 831358.
- [30] Yoshida K et al. Effects of RME30 on exhaust emissions and combustion in a diesel engine. SAE 2008-01-2499.

Article citation info:

Chłopek Z, Jagiełło S, Juwa S, Skrzek T. Comparative examination of performance characteristics of an IC engine fuelled with diesel oil and rape methyl esters. The Archives of Automotive Engineering-Archiwum Motoryzacji. 2016; 74(4):19-32, <http://dx.doi.org/10.14669/AM.VOL74.ART2>

Comparative examination of performance characteristics of an IC engine fuelled with diesel oil and rape methyl esters

Badania porównawcze właściwości użytkowych silnika spalinowego zasilanego olejem napędowym i estrami metylowymi oleju rzepakowego

Zdzisław Chłopek¹, Sebastian Jagiełło²,
Sebastian Juwa³, Tomasz Skrzek⁴

Politechnika Warszawska,
Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza
Pułaskiego w Radomiu

Summary

Results of comparative examination of the performance characteristics of a compression ignition (CI) engine fuelled with diesel oil and rape methyl esters (RME) have been presented. The engine performance characteristics were assessed from the point of view of energy (effective power and torque of the engine), economy (effective efficiency), and environmental impact (pollutant emission). At the tests, the admixture of summer and winter additives to the rape methyl esters was taken into account. The tests were carried out

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-791 Warszawa, Polska, e-mail: zchlopek@simr.pw.edu.pl

² Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-791 Warszawa, Polska, e-mail: jagiello.sebastian@gmail.com

³ Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-791 Warszawa, Polska, e-mail: sebastianjuwa@interia.pl

⁴ Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Mechaniczny, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, Al. Bolesława Chrobrego 45, 26-600 Radom, Polska, e-mail: t.skrzek@uthrad.pl

in the conditions of taking the full-load engine performance vs. engine speed on an AVL Single Cylinder Test Bed provided with a single-cylinder CI research engine AVL 5402, a set of exhaust gas analysers, and instrumentation to control the operation of the whole system. The measurement data were completed and analysed with the use of the AVL PUMA software. In result of the tests carried out, significant differences were found to exist between the engine performance characteristics obtained for the summer and winter versions of vegetable-oil methyl esters. Apart from this, the use of the biofuels under test was found to have a favourable impact on pollutant emission.

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań porównawczych właściwości użytkowych silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego olejem napędowym i estrami metylowymi oleju rzepakowego. Jako właściwości użytkowe silnika oceniano właściwości: energetyczne ze względu na moc użyteczną i moment obrotowy, ekonomiczne ze względu na sprawność ogólną oraz ekologiczne ze względu na emisję zanieczyszczeń. W badaniach uwzględniono estry metylowe oleju rzepakowego z dodatkami letnim i zimowym. Badania przeprowadzono w warunkach zewnętrznej charakterystyki prędkościowej na stanowisku badawczym AVL Single Cylinder Test Bed z jednocylindrowym silnikiem badawczym o zapłonie samoczynnym AVL 5402 i zespołem analizatorów spalin oraz oprzyrządowaniem sterującym pracą całego systemu. Do kompletowania oraz analizy danych wykorzystano oprogramowanie AVL PUMA. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono duże różnice we właściwościach użytkowych silnika dla wersji letniej i zimowej estrów metylowych olejów roślinnych. Stwierdzono również korzystny wpływ stosowania badanych biopaliw na emisję zanieczyszczeń.

Keywords: internal combustion engines, rape methyl ester, pollutant emission, fuel consumption, effective power

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, estry metylowe oleju rzepakowego, emisja zanieczyszczeń, zużycie paliwa, moc użyteczna

1. Wstęp

Poszukiwanie paliw niekonwencjonalnych w stosunku do klasycznych paliw ropopochodnych (benzyn silnikowych i olejów napędowych), w szczególności do zasilania silników spalinowych, jest podyktowane względami zarówno ekologicznymi, jak i ekonomicznymi. Wśród względów ekologicznych wymienia się przede wszystkim emisję zanieczyszczeń, nie tylko szkodliwych dla zdrowia, lecz także – w wypadku rozpatrywania paliw pochodzących ze źródeł odnawialnych – dwutlenku węgla kopalnego w związku z programami klimatycznymi, mającymi na celu zmniejszenie emisji dwutlenku węgla kopalnego [10, 18]. Do względów zarówno ekologicznych, jak i ekonomicznych, zalicza się poszukiwania paliw, nie pochodzących ze źródeł kopalnych, do działań na rzecz ochrony zasobów naturalnych [10]. Aspektem ekonomiczno-społecznym jest aktywizacja społeczności i obszarów dotychczas zaniedbanych w celu wytwarzania surowców na paliwa niekonwencjonalne [10, 18].

Wśród paliw niekonwencjonalnych w stosunku do klasycznych paliw ropopochodnych

szczególną rolę odgrywają tzw. paliwa zastępcze, tzn. takie, które mogą być stosowane w seryjnych silnikach o zapłonie iskrowym zamiast benzyny silnikowej oraz w seryjnych silnikach o zapłonie samoczynnym zamiast olejów napędowych [10]. Jest sprawą dyskusyjną, czy paliwa zastępcze są w ogóle obecnie dostępne. Zazwyczaj zastosowanie paliw niekonwencjonalnych wymaga więcej lub mniej zasadniczych zmian regulacyjnych silnika. Oczywiście w wypadku tzw. paliw syntetycznych jest możliwe zapewnienie im właściwości zbliżonych do oryginalnych paliw konwencjonalnych, jednak paliwa te są dotychczas stosunkowo kosztowne, a poza tym zapewnienie im takich właściwości jest zazwyczaj związane z niewykorzystywaniem ich wszystkich możliwości jako paliw silnikowych.

Spośród dotychczas rozpowszechnionych paliw niekonwencjonalnych w stosunku do klasycznych paliw ropopochodnych najbardziej zbliżone do kategorii paliw zastępczych są paliwa skomponowane na bazie estrów olejów biologicznych [1, 6–9, 11–23, 24, 26–30]. W niniejszym artykule badaniom poddano paliwa handlowe:

- klasyczny olejem napędowy – oznaczenie: ORLEN VERVA,
- biopaliwo samoistne B100 (RME – Rape Methyl Esters – estry metylowe oleju rzepakowego) z dodatkiem letnim – RME – S,
- biopaliwo samoistne B100 z dodatkiem zimowym – RME – W.

Badania zostały przeprowadzone głównie w celu oceny, na ile jest możliwe uznanie biopaliw RME – S i RME – W za paliwa zastępcze oleju napędowego.

Badania właściwości silników o zapłonie samoczynnym, zasilanych estrami olejów biologicznych, mają długą tradycję. Sama idea stosowania paliw pochodzenia biologicznego nie jest w żadnym wypadku nowa. Wprost przeciwnie: pierwsze paliwa używane przez ludzi były pochodzenia biologicznego. Pierwsze udokumentowane ślady użytkowania ognia przez ludzi pochodzą sprzed 300 tysięcy lat z Czoukoutien w Chinach, gdzie homo erectus pekinensis używał jako paliwa drewna [25].

Idea zastosowania paliw pochodzenia biologicznego do zasilania silników jest również stara. Już do zasilania pierwszych silników spalinowych były stosowane paliwa pochodzenia biologicznego: alkohole, oleje roślinne i biogaz. Historycznie pierwszym udokumentowanym doniesieniem o zastosowaniu do zasilania silników o zapłonie samoczynnym paliw pochodzenia biologicznego jest informacja zawarta w opisie patentowym Rudolfa Christiana Karla Diesla z 1892 r.: „Chociaż wykorzystanie oleju roślinnego jako paliwa jest w obecnych czasach zagadnieniem o niewielkim znaczeniu, to nie jest wykluczone, że z biegiem lat paliwa tego rodzaju będą zyskiwać na znaczeniu, podobnie jak to ma miejsce w przypadku paliw węgl- i ropopochodnych obecnie” [28].

Literatura, związana ze stosowaniem estrów olejów roślinnych do zasilania silników o zapłonie samoczynnym, dotyczy przede wszystkim:

- ekologicznych właściwości silników ze względu na emisję zanieczyszczeń [1, 6–24, 26–30],
- energetycznych właściwości silników ze względu na moc użyteczną i moment obrotowy [1, 6–24, 26–30],
- ekonomicznych właściwości silników ze względu na jednostkowe zużycie paliwa, sprawność ogólną [1, 6–24, 26–30] i – dla pojazdów – eksploatacyjne zużycie paliwa [7–9, 28],
- eksploatacyjnych właściwości silników ze względu na niezawodność silników, zużycie ich elementów oraz – przede wszystkim – ze względu na właściwości rozruchowe silników w niskich temperaturach [28],

- właściwości procesu spalania w silnikach o zapłonie samoczynnym estrów olejów biologicznych [1, 11, 12, 14, 17, 20, 22, 23, 26],
- metod wytwarzania paliw silnikowych z olejów biologicznych różnego pochodzenia [28].

Właściwościom silników spalinowych zasilanych biopaliwami są poświęcone m.in. monografie [22, 28] oraz rozprawy doktorskie [14, 20, 23]. Szczegółowe prace dotyczą zasilania silników zarówno biopaliwami samoistnymi [1, 6–24, 26–29], jak i mieszaninami estrów olejów biologicznych z olejem napędowym [1, 7–9, 11, 14, 15, 19–24, 26–30]. Część prac jest poświęcona wynikom badań procesu spalania biopaliw w silnikach [1, 11, 12, 14, 16, 20, 22, 23, 26].

Najczęściej pojawiające się w doniesieniach literaturowych wnioski można podsumować w następujący sposób:

1. Zastosowanie estrów olejów roślinnych powoduje nieznaczne zmniejszenie emisji tlenku węgla i węglowodorów oraz duże zmniejszenie emisji cząstek stałych [1, 6–24, 26–30]. Znaczna część źródeł informuje o zwiększeniu emisji tlenków azotu: różnice w tym zakresie są znaczne – względne zwiększenie emisji tlenków azotu mieści się w granicach (10 ÷ 30)%.
2. Zastosowanie do zasilania samochodowych silników o zapłonie samoczynnym estrów metylowych oleju rzepakowego powoduje zwiększenie eksploatacyjnego zużycia paliwa – względne zwiększenie eksploatacyjnego zużycia paliwa wynosi około 10% [7–9].
3. Użytkowanie estrów olejów roślinnych wiąże się z problemami eksploatacyjnymi, w szczególności z rozwojem flory bakteryjnej w układach zasilania [28] oraz z pogorszeniem się właściwości rozruchowych silników w niskiej temperaturze z powodu przede wszystkim dużej lepkości estrów olejów roślinnych w niskiej temperaturze [28].
4. Stwierdza się również agresywne oddziaływanie chemiczne estrów olejów roślinnych na niektóre materiały silników spalinowych, w szczególności układów zasilania: zarówno metalowych, jak i – przede wszystkim – niemetalowych [28].
5. Badania procesu spalania w cylindrach silników spalinowych wskazują przede wszystkim na różnice czasu opóźnienia samozapłonu oraz szybkości narastania ciśnienia w wypadku stosowania biopaliw [1, 11, 12, 14, 16, 20, 22, 23, 26]. Zazwyczaj stwierdza się tendencję do zmniejszenia czasu opóźnienia samozapłonu oraz szybkości narastania ciśnienia w stosunku do oleju napędowego [1, 11, 12, 14, 16, 20, 22, 23, 26].

2. Badania empiryczne silnika

Badania porównawcze właściwości użytkowych silnika spalinowego zasilanego olejem napędowym i estrami metylowymi oleju rzepakowego przeprowadzono w Zakładzie Pojazdów i Silników Samochodowych Instytutu Eksploatacji Pojazdów i Maszyn na Wydziale Mechanicznego Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu w ramach realizacji prac dyplomowych przez Sebastiana Jagiełłę i Sebastiana Juwę, prowadzonych pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Zdzisława Chłopka.

Badania empiryczne zostały przeprowadzone na stanowisku badawczym AVL Single Cylinder Test Bed [5] z jednocylinrowym silnikiem badawczym o zapłonie samoczynnym AVL 5402 [3] oraz zespołem analizatorów spalin oraz oprzyrządowaniem sterującym pracą

całego systemu. Do kompletowania oraz analizy danych służyło oprogramowanie AVL PUMA [4].

Podstawowe dane silnika AVL 5402 zawarto w tabeli.

Tabela. Podstawowe informacje o silniku AVL 5402

Liczba cylindrów	1
Średnica cylindra	85,01 mm
Skok tłoka	90,00 mm
Objętość skokowa	511,00 cm ³
System spalania	o zapłonie samoczynnym
Rozrząd	czterozaworowy
Stopień sprężania	17,0 ÷ 17,5
System zasilania	wtrysk bezpośredni, jeden wtryskiwacz, układ zasobnikowy (Common Rail)
Maksymalna moc użyteczna, bez doładowania	6 kW
Maksymalna moc użyteczna, z doładowaniem	16 kW
Znamionowa prędkość obrotowa	4200 min ⁻¹
Ciśnienie wtrysku	180 MPa

Silnik AVL 5402 ma, dzięki zastosowaniu specjalnych podkładek pod głowicę, możliwość zmiany stopnia sprężania. Specjalne otwory w głowicy pozwalają na wprowadzenie do komory spalania kamer i obserwowania przebiegu spalania mieszanki. Silnik jest wyposażony w układ recyrkulacji spalin oraz czujniki pozwalające między innymi na pomiar ciśnienia w komorze spalania i temperatury gazów wylotowych. Dzięki zainstalowanej aparaturze wtryskowej oraz dołączonemu oprogramowaniu można modyfikować algorytm zasilania silnika paliwem.

Zespół testowy AVL Single Cylinder Test Bed jest wyposażony w chłodzoną wodą hamulec elektrowirowy AVL DP80 do zadawania obciążenia oraz silnik elektryczny pozwalający na rozruch i napęd silnika, a także pompy i wymienniki ciepła zapewniające obieg cieczy chłodzącej oraz utrzymywanie ich temperatury.

Program badań obejmował pracę silnika w stanach statycznych na zewnętrznej charakterystyce prędkościowej w zakresie prędkości obrotowej (1200 ÷ 3600) min⁻¹ co 400 min⁻¹. Podstawowe pomiary obejmowały m.in. następujące wielkości:

- prędkość obrotową – n ,
- moment obrotowy – M_e ,
- masowe natężenie zużycia paliwa – G_f ,
- masowe natężenie zużycia powietrza – G_a ,
- objętościowe stężenie tlenku węgla – c_{CO} ,
- objętościowe stężenie węglowodorów – c_{HC} ,
- objętościowe stężenie tlenków azotu – c_{NO_x} ,
- masowe stężenie cząstek stałych – c_{PM} ,
- ciśnienie indykowane – p_g , rejestrowane w dziedzinie kąta obrotu wału korbowego – α ,
- temperaturę spalin – T_{ex} .

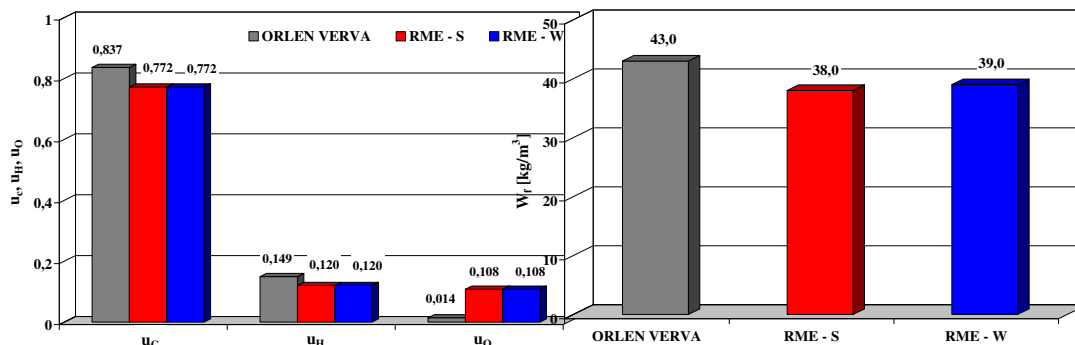
Aparatura zastosowana do badań jest zgodna z wymaganiami następujących przepisów: Dyrektywa 1999/96/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 13 grudnia 1999 r.,

Rozporządzenie (WE) nr 715/2007 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 20 czerwca 2007 r. oraz Rozporządzenie Komisji (WE) nr 692/2008 z dnia 18 lipca 2008 r.

W niniejszym artykule ograniczono się tylko do wyników, dotyczących właściwości silnika: energetycznych, ekonomicznych i ekologicznych, nie są natomiast przedstawione – ze względu na ograniczoną objętość pracy – wyniki analizy procesu spalania.

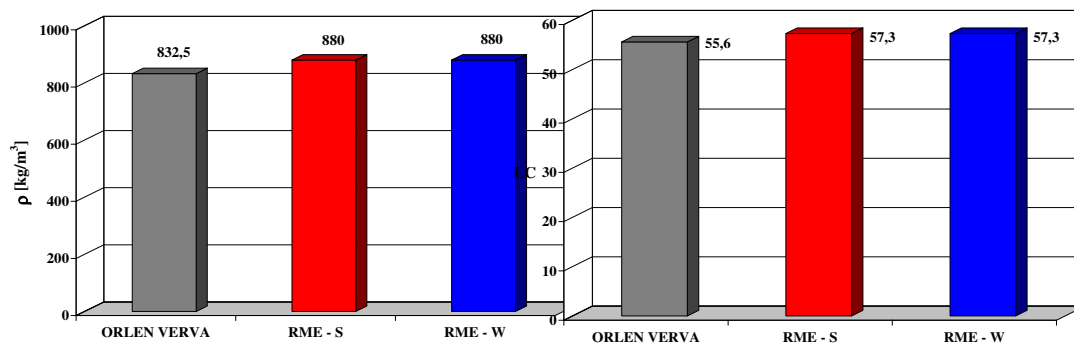
Na rysunkach 1–6 przedstawiono porównanie podstawowych właściwości paliw:

- skład elementarny paliw: zawartość masową węgla – u_C , wodoru – u_H i tlenu – u_O ,
- wartość opałową – W_f ,
- gęstość – ρ ,
- liczbę cetanową – LC,
- lepkość kinematyczną w temperaturze 40°C – ν ,
- temperaturę zablokowania zimnego filtra paliwa – t_b .



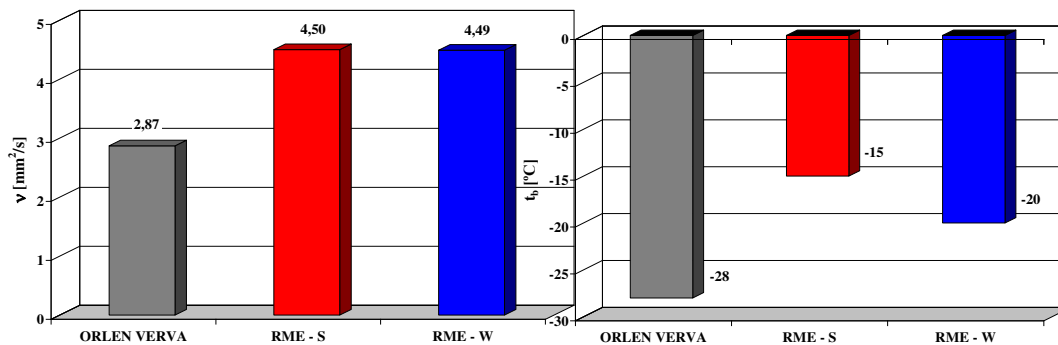
Rys. 1. Skład elementarny paliw: zawartość masowa węgla – u_C , wodoru – u_H i tlenu – u_O

Rys. 2. Wartość opałowa paliw – W_f



Rys. 3. Gęstość paliw – ρ

Rys. 3. Liczba cetanowa paliw – LC

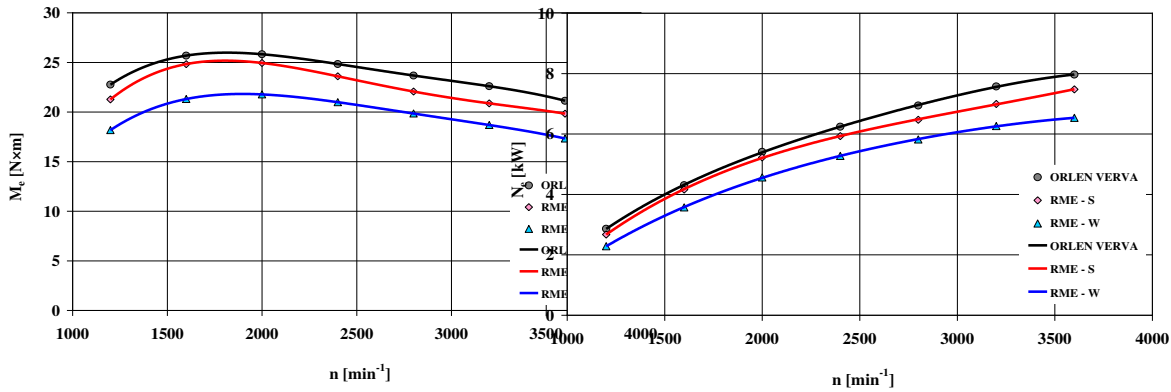


Rys. 5. Lepkość kinematyczna paliw w 40°C – ν Rys. 6. Temperatura zablokowania zimnego filtra paliwa – t_b

Biopaliwa mają znacznie większy udział masowy tlenu – prawie o rząd wielkości większy niż w wypadku oleju napędowego, w związku z czym wartość opałowa paliw RME jest mniejsza o ponad 10% od wartości opałowej oleju napędowego. Gęstość paliw RME jest większa od gęstości oleju napędowego o około 6%, natomiast paliwa RME mają lepszą skłonność do samozapłonu – liczbę cetanową większą o około 1,7. Dużo większa jest lepkość kinematyczna paliw RME w 40°C w odniesieniu do oleju napędowego – różnica względna wynosi prawie 60%. Istotne różnice są w wartościach temperatury zablokowania zimnego filtra paliwa – zdecydowanie gorsze są właściwości biopaliw, szczególnie wersji letniej – RME – S.

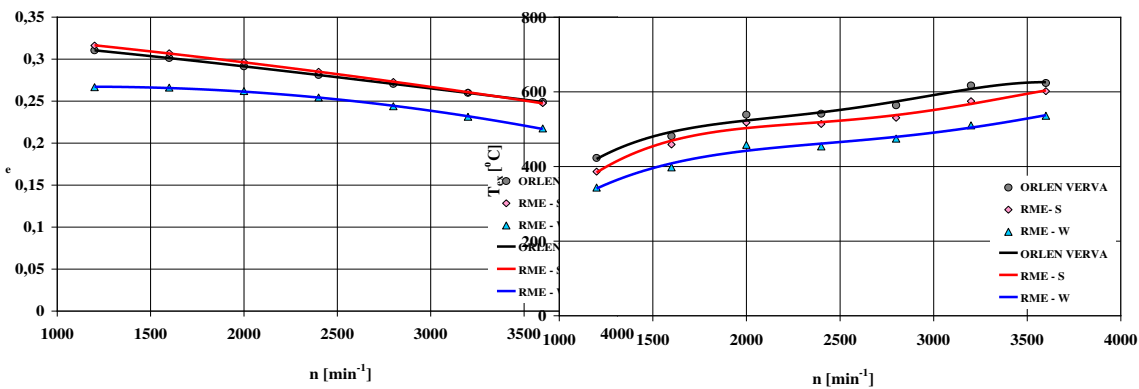
Na rysunkach 7–12 przedstawiono charakterystyki prędkościowe podstawowych wielkości charakteryzujących właściwości silnika:

- energetyczne: moment obrotowy – M_e i moc użyteczną – N_e ,
- ekonomiczne ze względu na zużycie paliwa: sprawność ogólną – η_e ,
- temperaturę spalin – T_{ex} ,
- ekologiczne ze względu na emisję zanieczyszczeń:
 - stężenia substancji szkodliwych dla zdrowia, zawartych w spalinach, mianowicie: objętościowe stężenie tlenu węgla – c_{CO} , objętościowe stężenie węglowodorów – c_{HC} , objętościowe stężenie tlenków azotu – c_{NOx} i masowe stężenie cząstek stałych – c_{PM} ,
 - emisja jednostkowa zanieczyszczeń, mianowicie: tlenu węgla – e_{CO} , węglowodorów – e_{HC} , tlenków azotu – e_{NOx} i cząstek stałych – e_{PM} .



Rys. 7. Charakterystyka prędkościowa: momentu obrotowego – M_e i mocy użytecznej – N_e

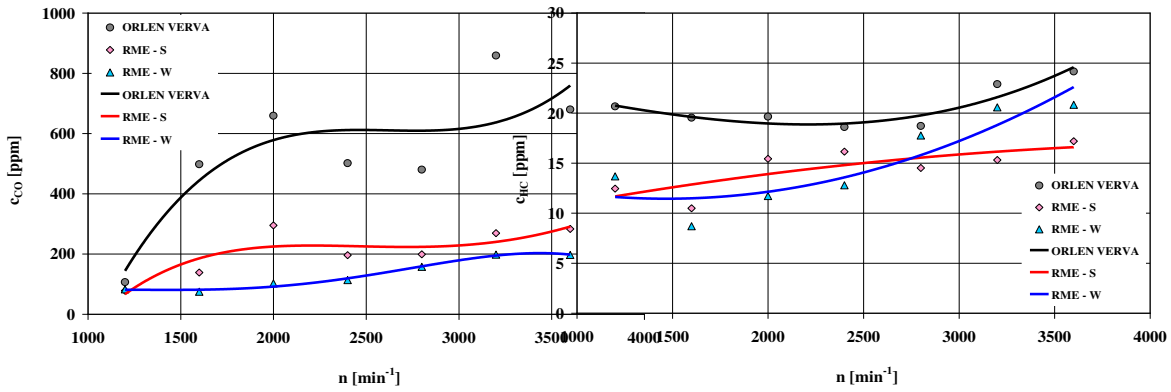
Ze względu na mniejszą wartość opałową biopaliw zarówno moment obrotowy, jak i moc użyteczna silnika zasilanego paliwami RME są mniejsze niż w wypadku zasilania olejem napędowym, jednak różnica dla paliwa letniego jest niewielka, co wynika z większej sprawności ogólnej silnika zasilanego paliwem RME – S w stosunku do sprawności ogólnej silnika pracującego na paliwie RME – W. Wartość maksymalna momentu obrotowego występuje dla prędkości obrotowej równej około 1600 min^{-1} , a największej mocy użytecznej dla 3600 min^{-1} .



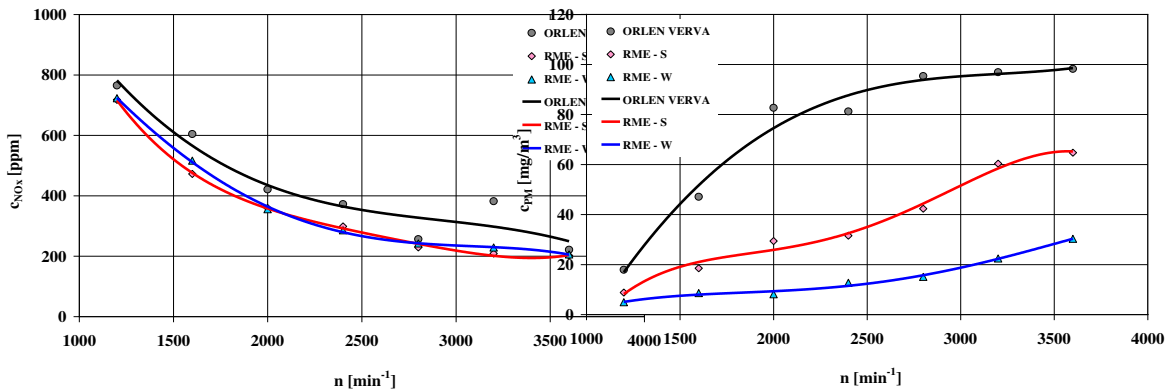
Rys. 8. Charakterystyka prędkościowa: sprawności ogólnej – η_e i temperatury spalin – T_{ex}

Sprawność ogólna dla oleju napędowego i letniego biopaliwa jest zbliżona, natomiast dla paliwa RME – W wyraźnie mniejsza.

Temperatura spalin jest największa dla oleju napędowego, co wynika z większej wartości opałowej tego paliwa w stosunku do wartości opałowej badanych biopaliw, choć zazwyczaj cząsteczkową bliskością tlenu oraz węgla i wodoru, jak ma to miejsce w wypadku estrów olejów, tłumaczy się wysoką temperaturę ich spalania, co ma wpływ na dużą emisję tlenków azotu [6–9, 13, 14, 17–22, 27, 28, 30].

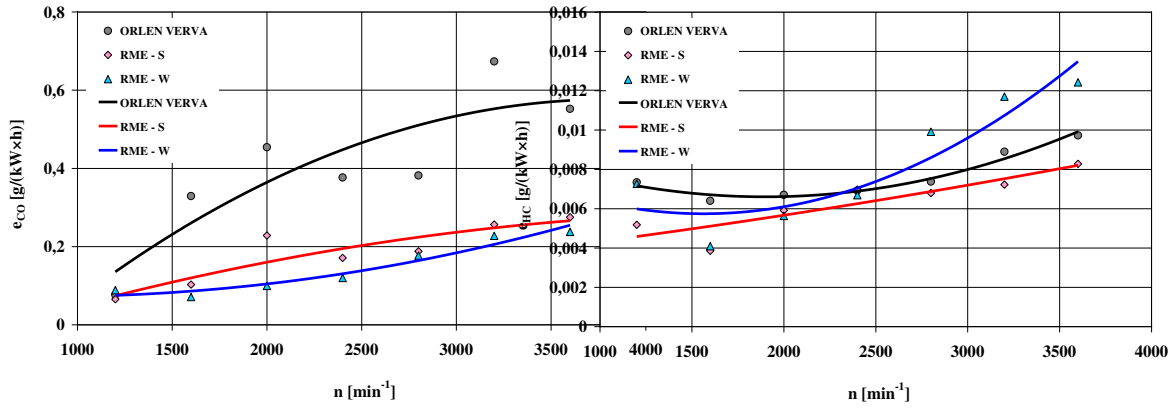


Rys. 9. Charakterystyka prędkościowa: objętościowego stężenia tlenu węgla – c_{CO} i objętościowego stężenia węglowodorów – c_{HC}

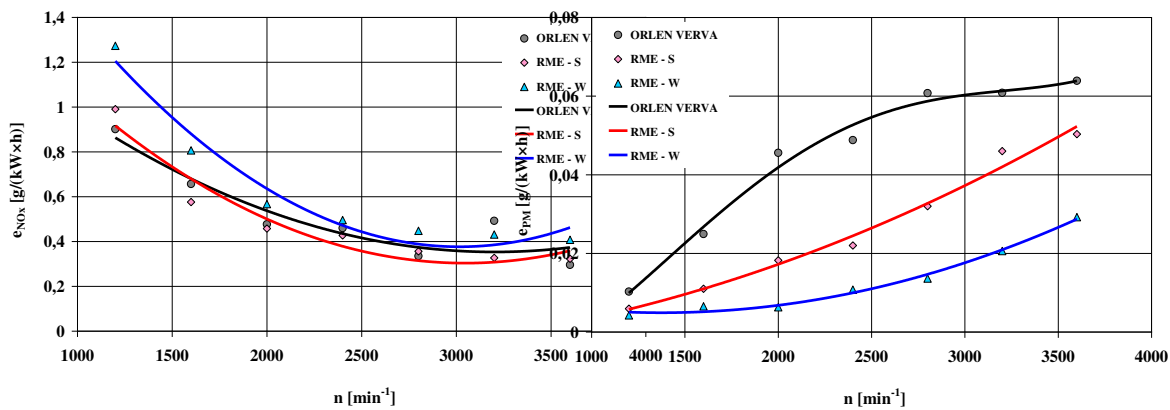


Rys. 10. Charakterystyka prędkościowa: objętościowego stężenia tlenków azotu – c_{NOx} i masowego stężenia cząstek stałych – c_{PM}

Charakterystyki stężeń zanieczyszczeń wykazują niekiedy znaczną nieregularność, utrzymuje się jednak dla biopaliw tendencja mniejszego stężenia tlenu węgla i cząstek stałych, nieznacznie mniejszego stężenia węglowodorów oraz – co nie potwierdza wiele wyników badań [6–9, 13, 14, 17–22, 27, 28, 30] – nie tylko braku zwiększania się stężenia tlenków azotu, ale nawet nieznacznie mniejszych jego wartości.



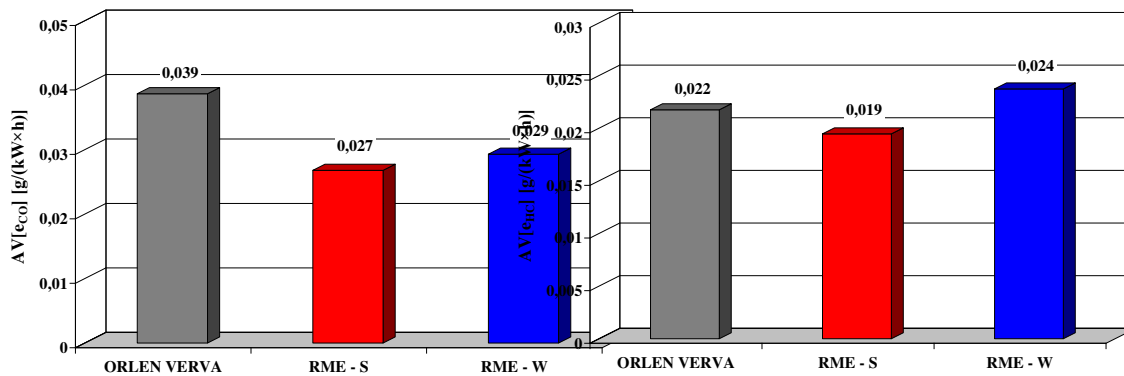
Rys. 11. Charakterystyka prędkościowa: emisji jednostkowej tlenku węgla – e_{CO} i emisji jednostkowej węglowodorów – e_{HC}



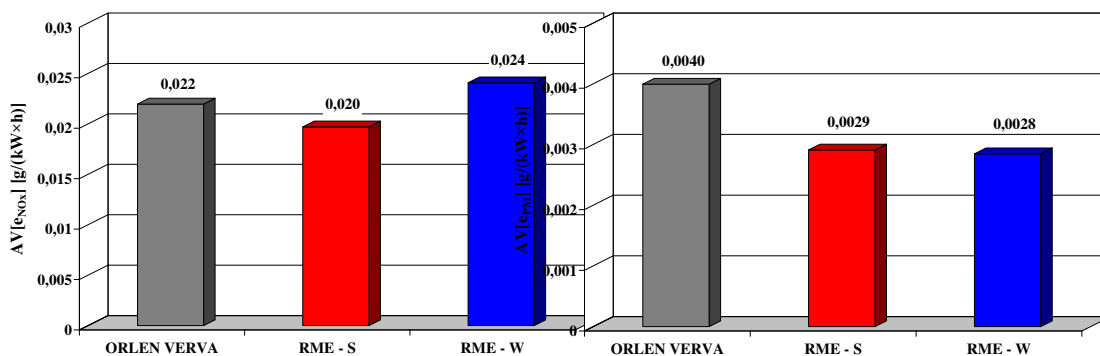
Rys. 12. Charakterystyka prędkościowa: emisji jednostkowej tlenków azotu – e_{NOx} i emisji jednostkowej cząstek stałych – e_{PM}

Emisja jednostkowa tlenku węgla i emisji jednostkowa cząstek stałych są wyraźnie mniejsze dla biopaliw, natomiast dla węglowodorów i tlenków azotu wartości są podobne dla ocenianych paliw.

Na rysunkach 13 i 14 przedstawiono wartość średnią w dziedzinie prędkości obrotowej emisji jednostkowej zanieczyszczeń dla poszczególnych paliw.



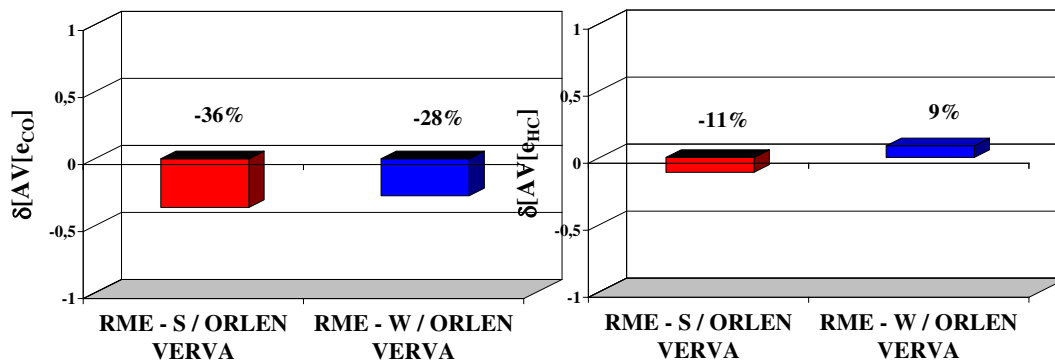
Rys. 13. Wartość średnia w dziedzinie prędkości obrotowej emisji jednostkowej tlenku węgla – AV[e_{CO}] i emisji jednostkowej węglowodorów – AV[e_{HC}]



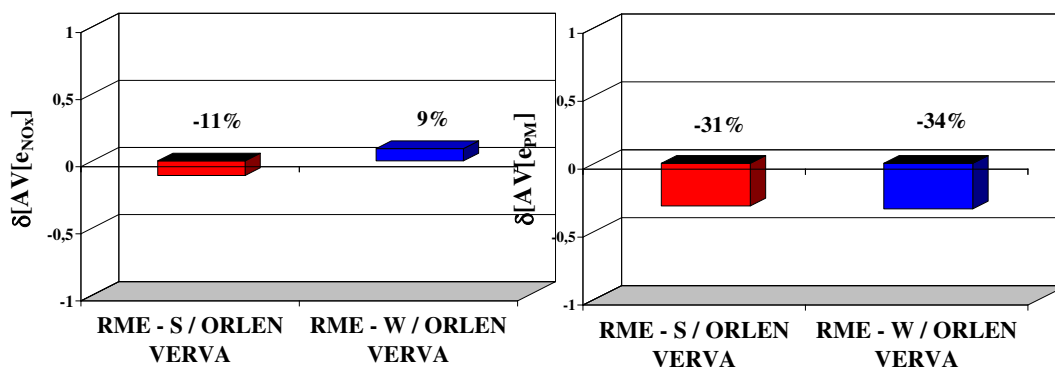
Rys. 14. Wartość średnia w dziedzinie prędkości obrotowej emisji jednostkowej tlenków azotu – AV[e_{NOx}] i emisji jednostkowej cząstek stałych – AV[e_{PM}]

Również w wypadku wartości średniej w dziedzinie prędkości obrotowej emisji jednostkowej zanieczyszczeń – ze względu na rozpatrywane paliwa – największa różnica jest dla tlenku węgla i cząstek stałych. W wypadku tlenku węgla najmniejsza wartość jest dla paliwa RME – S, w wypadku cząstek stałych – dla paliwa RME – W.

Na rysunkach 15 i 16 przedstawiono względną zmianę δ wartości średniej w dziedzinie prędkości obrotowej emisji jednostkowej zanieczyszczeń.



Rys. 15. Względna zmiana – δ wartości średniej w dziedzinie prędkości obrotowej – AV emisji jednostkowej: tlenku węgla – e_{CO} i węglowodorów – e_{HC}



Rys. 16. Względna zmiana – δ wartości średniej w dziedzinie prędkości obrotowej – AV emisji jednostkowej: tlenków azotu – e_{NOx} i cząstek stałych – e_{PM}

Zastosowanie biopaliw powoduje względne zmniejszenie wartości średniej w dziedzinie prędkości obrotowej emisji tlenku węgla i cząstek stałych o około 30%. Dla węglowodorów i tlenków azotu różnica względna wynosi około 10%, przy czym dla paliwa RME – S jest to zmniejszenie emisji jednostkowej, a dla paliwa RME – W – zwiększenie.

3. Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych badań umożliwiają sformułowanie następujących wniosków:

1. Moc użyteczna i moment obrotowy silnika spalinowego są największe w wypadku oleju napędowego, nieznacznie mniejsze są dla biopaliwa letniego, a znacznie mniejsze – dla biopaliwa zimowego.
2. Zastosowanie estrów metylowych oleju rzepakowego spowodowało wymierne zmniejszenie emisji tlenku węgla i cząstek stałych – o około 30%. Dla węglowodorów i tlenków azotu różnica względna wynosi około 10%, przy czym dla paliwa letniego jest to zmniejszenie emisji jednostkowej, a dla paliwa zimowego – zwiększenie. Wynik dla emisji tlenków azotu jest niejednoznaczny, tym bardziej, że temperatura

spalin jest największa dla oleju napędowego, nieznacznie mniejsza dla paliwa RME – S i znacznie mniejsza dla RME – W.

3. Stwierdzono podobną sprawność ogólną silnika spalinowego zasilanego olejem napędowym i letnim biopaliwem. Dla biopaliwa zimowego sprawność ogólna jest wyraźnie mniejsza.

Ogólnie można stwierdzić, że niewielkie różnice w ocenianych właściwościach użytkowych silnika spalinowego zasilanego olejem napędowym oraz estrami metylowymi oleju rzepakowego upoważniają do ostrożnej oceny, iż – w wyniku przeprowadzonych badań – można uznać estry metylowe oleju rzepakowego z dodatkami letnim i zimowym jako paliwa zastępcze oleju napędowego. W celu bardziej wnikliwej oceny przydatności zastosowania estrów metylowych oleju rzepakowego jako paliwa zastępczego oleju silnikowego jest celowe przeprowadzenie badań procesu spalania w cylindrze silnika.

Podziękowanie:

Autorzy artykułu z Politechniki Warszawskiej wrażają swą wdzięczność władzom i pracownikom Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, w szczególności dyrektorowi Instytutu Eksploatacji Pojazdów i Maszyn i kierownikowi Zakładu Pojazdów i Silników Samochodowych Panu prof. drowi hab. inż. Sławomirowi Luftowi, a także pracownikowi Zakładu Panu drowi inż. Tomaszowi Skrzekowi za umożliwienie przeprowadzenia dyplomantom badań. Słowa wdzięczności są skierowane również do uczestniczącego w pracach organizacyjnych, związanych z badaniami, pracownika Zakładu Pojazdów i Silników Samochodowych w Instytucie Eksploatacji Pojazdów i Maszyn na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu oraz Zakładu Silników Spalinowych Instytutu Pojazdów na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej dra inż. Grzegorza Pawlaka.

Literatura

1. Ambrozik A, Orliński P, Orliński S. Influence of diesel engine fuelling with different fuels on self-ignition delay in aspect of ecology. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 2003; 3: 50–55.
2. AVL: GCA gas exchange and combustion analysis – User's guide.
3. AVL: Product description. Single cylinder research engine.
4. AVL: PUMA open automation platform. Available from: <https://www.avl.com/-/avl-puma-open-automation-platform>. [cited 2015 Jul 11].
5. AVL: Testing solutions. Measure and control. Single cylinder research engines & compact test bed.
6. Chłopek Z. et al.: Research of the influence non-conventional fuels on the pollutant emission from an engine to a generating set. IV International Congress of Internal Engines. Radom 2011.
7. Chłopek Z, Bardziński W, Jarczewski M, Sar H. Influence of fatty acid methyl esters' additive to diesel engine on ecology, fuel consumption and vehicle's performance. *Journal of KONES*. 2006; 1: 261–268.
8. Chłopek Z, Bardziński W, Jarczewski M, Sar H. Emission of pollution from engine powered by the fuel with additive of methyl ester of rape oil in dynamic tests. *Journal of KONES*. 2005: 63–70.

9. Chłopek Z, Bardziński W, Jarczewski M, Sar H. Influence of adding fatty acid methyl esters to the diesel fuel on pollutants emission from diesel engine in dynamic road test cycles. International Congress on Combustion Engines. Szczyrk 2005.
10. Chłopek Z. Ekologiczne aspekty motoryzacji i bezpieczeństwo ruchu drogowego. Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2012.
11. Chuepeng S, et al. A study of quantitative impact on emissions of high proportion RME based biodiesel blends. SAE 2007-01-0072.
12. Crookes R J, Korakianitis T, Namasivayam A M. A systematic experimental assessment of the use of rapeseed methyl ester (RME) as a compression ignition engine fuel during conventional and dual-fuel operation. TAE 7th International Colloquium on Fuels. Stuttgart. 2009.
13. Czerwinski J et al. Influences of alternative fuels GTL, RME & ROR on combustion and emissions of a modern HD-diesel engine. Verbrennungsforschung in der Schweiz, BfE Tagung, ETHZ 2009.
14. Hopp M. Untersuchung des Einspritzverhaltens und des thermischen Motorprozesses bei Verwendung von Rapsöl und Rapsmethylester in einem Common-Rail-Dieselmotor. Dissertation. Universität Rostock, 2005. Available from: https://www.avl.com/combustion-measurement1/-/asset_publisher/gYjUpY19vEA8/content/single-cylinder-research-engines-compact-test-bed. [cited 2015 Jul 11]. <https://www.avl.com/documents/10138//885965//AVL+SCRE+ProductDescription+eng+2014.pdf>.
15. Kowalewicz A. Eco-diesel engine fuelled with rapeseed oil methyl ester and ethanol. Part 3: combustion processes. Proc. IMechE, Part D: J. Automobile Engineering. 2006; 220: 1283–1291.
16. Labeckas G, Slavinskas S. The effect of rapeseed oil methyl ester on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions. Energy Conversion and Management. 2006; 47: 1954–1967.
17. Mamat R et al. Effect of air intake pressure drop on performance and emissions of a diesel engine operating with biodiesel and ultra low sulphur diesel (ULSD). International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICRE PQ'09). Valencia (Spain). 2009.
18. Marecka-Chłopek E, Chłopek Z. Eksploatacyjne aspekty zastosowania paliw pochodzenia biologicznego do zasilania silników spalinowych. (Operation aspects of biofuels use to supply of internal combustion engines). Transport Samochodowy. 2007; 4: 59–76.
19. Mayer A C R, Czerwinski J, Wyser M. Impact of RME/Diesel Blends on Particle Formation, Particle Filtration and PAH Emissions. SAE 2005-01-1728.
20. Namasivayam A M. Combustion: Performance and emissions characteristics of compression-ignition engines fuelled by sustainable fuels. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy to the University of London. School of Engineering and Materials Science Queen Mary University of London. 2011.
21. Nwafor O M I. Emission characteristics of diesel engine operating on rapeseed methyl ester. Renewable Energy. 2004; 29: 119–129.

22. Orliński P. Wybrane zagadnienia procesu spalania paliw pochodzenia roślinnego w silnikach o zapłonie samoczynnym (Selected issues of the combustion of vegetable-derivative fuels in compression ignition engines). Instytut Naukowo-Wydawniczy „SPATIUM”. Radom 2013.
23. Rounce P L. Engine performance and particulate matter speciation for compression ignition engines powered by a range of fossil and biofuels. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. The University of Birmingham. School of Engineering. 2011.
24. Ruan D F, Cheng W L, Lee C F. Comparison of performance and combustion characteristics of diesel fuel and vegetable oils in diesel engine. 2008 SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress. Shanghai, China. 2008.
25. Sautman B. Peking man and the politics of paleoanthropological nationalism in China. *The Journal of Asian Studies*. 2001; 60(1): 95–124.
26. Scholz C, Starý P. Experimental study of common rail injection diesel engine fuelled with RME and diesel fuel. XLII International Scientific Conference of Czech and Slovak University Departments and Institutions Dealing with the Research of Combustion Engines. Zilina, Slovakia, 2011.
27. Stępień Z et al. Research on emissions and engine lube oil deterioration of diesel engines with biofuels (RME). SAE 2011–01–1302.
28. Szlachta Z. Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami rzepakowymi (Feeding of compression ignition engines with rape fuels). WKŁ. Warszawa 2002.
29. Wellguth G. Performance of vegetable oils and their monoesters as fuels for diesel engines. SAE 831358.
30. Yoshida K et al. Effects of RME30 on exhaust emissions and combustion in a diesel engine. SAE 2008–01–2499.