

Marietta MARKIEWICZ, Łukasz MUŚLEWSKI  
 UTP University of Science and Technology, Bydgoszcz  
 (Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy)

## ANALYSIS OF SELECTED PERFORMANCE PARAMETERS OF ENGINE POWERED WITH A MIXTURE OF BIOCOMPONENTS AND DIESEL OIL

### Analiza wybranych parametrów użytkowych silnika ZS zasilanego mieszankami oleju napędowego i biokomponentu

**Abstract:** *The most desirable effect of motorization development is providing a drive unit with high performance parameters and reduce the environmental impact. This study presents the results of tests of a self-ignition engine power output and torque. The tested engine was powered with diesel oil and a mixture of fatty acid methyl esters in the proportions of 10%, 30% and 50% with performance additives, for standard settings of the fuel injection system. The tests were carried out on a chassis dynamometer for full load of the engine. The vehicle was placed on the dynamometer rollers and attached to the base by means of belts. The analysis shows that application of the mixture decreases the engine performance parameters to such a degree that the engine is not put at any risk of damage.*

**Keywords:** transport, transport means, combustion engine, diesel oil, biocomponent, alternative fuels

**Streszczenie:** *Najbardziej pożądanym efektem rozwoju motoryzacji jest uzyskiwanie wysokich parametrów jednostki napędowej i małe zanieczyszczenie środowiska naturalnego. W pracy przedstawiono badania mocy użytecznej oraz momentu obrotowego silnika z zapłonem samoczynnym. Badany silnik zasilany był olejem napędowym i mieszanką estrów metylowych kwasów tłuszczowych i oleju napędowego w proporcjach 10%, 30% i 50% z dodatkiem uszlachetniającym, przy standardowych ustawieniach sterownika wtrysku paliwa. Badania prowadzone były na hamowni podwoziowej, przy pełnym obciążeniu silnika. Z ich analizy wynika, że stosowanie mieszanki obniża parametry silnika w stopniu niezauważalnym podczas jego eksploatacji.*

**Słowa kluczowe:** transport, środki transportu, silnik spalinowy, olej napędowy, biokomponent, paliwa alternatywne

## **1. Introduction**

There is a high demand for alternative fuels for fueling combustion piston engines as they significantly reduce depletion of natural resources. Alternative fuels which are most frequently used to power self-ignition engines are transesterified plant oils. Raw plant oils are produced for food purposes which means that they do not meet the requirements of DIN 51 605 norm and cannot be used to fuel transport means. The material which is most commonly used to manufacture biocomponents (fatty acid methyl esters) is rape oil. The production of rape has significantly increased in Germany, France, Italy as well as in Belarus and Ukraine. In Poland, the production of rape is concentrated in the regions of Kujawy, Żuławy, Pomorze Zachodnie and Olsztyńskie, Lubelskie, Opolskie and Wrocławskie voivodeships. These varieties of rape that can be used for energy purposes need to be improved and have low content of eruekic acid and glucosinolates [12].

It is not possible to use the rape oil in its pure form for self-ignition engines due to its high viscosity coefficient. To manufacture a rape oil suitable for fueling combustion engines it is necessary to decrease its viscosity coefficient [6] by:

- diluting the oil with fuel of petroleum origin,
- mixing it with micromolecular alcohols,
- distillation or other technological processes,
- chemical reaction to release esters (transesterification).

Transesterification, that is, a reaction which leads to exchange of glycerol contained in a particle of fat (triacylglycerol) for a micromolecular aliphatic alcohols (methanol, ethanol, propanol, butanol) is the most commonly used procedure. [12]. The process of transesterification is carried out in the temperature of 60–70°C in the presence of an alkaline catalyst. In order to provide a high degree of ester conversion, a significant excess of methanol is used which after the transesterification process is distilled and reentered to the process [14].

The fatty acid methyl esters that are provided by the process are mixed with diesel oil. Thus, an alternative fuel is created to be used in self injection engines. It is referred to as biodiesel. Contrary to diesel oil, biodiesel is nontoxic and its use reduces harmful exhaust emissions to the atmosphere [2]. Biodiesel is characterized by better lubricating properties than the traditional diesel oil, which extends the engine life [3, 13].

Apart from ecological aspects involved in functioning of transport means, it is also important to identify the criteria for assessment of their functioning [1, 4, 5, 11]. These criteria are expressed by means of performance parameters which directly depend on the fuel used to power their engines. The most frequently used indexes of transport means drive unit operation are power and torque. In domestic and foreign literature one can find results of research on diesel engine propulsion with fatty acid methyl esters [8, 9, 10, 13]. The experimental tests covered such parameters as: engine performance, ecological characteristics, calorific value of fatty acid methyl esters, density and viscosity of fatty acid methyl esters [4, 5]. Tests have shown the engine lower performance by 7-8% and lower drops in the engine power as compared to diesel oil, depending on the combustion system and

properties of the ignition system, due the lower calorific value and higher density parameter of fatty acid methyl esters.

The aim of the research was to compare the power and torque of a selected drive unit powered by mixtures of diesel oil and fatty acid methyl esters. In the conducted experiment, the composition of the fuel mixture was of importance, as in the available literature there are few operational studies concerning the mixture of 50% diesel oil and 50% fatty acid methyl esters. No operational tests have been found either for a mixture of 50% diesel oil and 50% fatty acid methyl esters with an enriching additive improving the physicochemical properties of the fuel mixture.

## **2. Research methodology**

The material used for tests was a plant oils subjected to testerification, commonly referred to as a biocomponent, which was mixed with diesel oil in different proportions. The mixtures of diesel oil and fatty acid methyl esters were prepared in specified proportions and adequately marked, which is presented in tab. 1. An additive introduced to a mixture of 50% of diesel oil and 50% was supposed to increase the cetane number and improve the fuel lubrication properties. The diesel fuel used in the research came directly from the supplier and was free from the addition of a biocomponent. The physicochemical properties of the fuel mixtures used are presented in tab. 2.

**Table 1**

### **Proportions of the tested mixtures**

No.	Mixture content	Mixture marking
1	Diesel oil	Mixture I
2	90% of diesel oil and 10% of fatty acid methyl esters	Mixture II
3	70% of diesel oil 30% of fatty acid methyl esters	Mixture III
4	50% of diesel oil and 50% of fatty acid methyl esters with a refining additive	Mixture IV

An additive introduced to a mixture of 50% of diesel oil and 50% was supposed to increase the cetane number and improve the fuel lubrication properties. The diesel fuel used in the research came directly from the supplier and was free from the addition of a biocomponent. The physicochemical properties of the fuel mixtures used are presented in tab. 2.

**Table 2**

**Physicochemical properties of test mixtures**

Properties	Mixture I	Mixture II	Mixture III	Mixture IV	Mixture V
Viscosity [mPa*s]	6,46	6,26	7,8	8,56	9,2
Cetane number	53,33	54,94	55,92	58,40	52,60
Heat of combustion [J/g]	44277	44379	43139	41770	42917
Calorific value [J/g]	43097	43199	41959	40590	41750

The research object was a self-ignition diesel engine with direct fuel injection of the common rail type with electromagnetic injectors. The tested engine cooperated with a dual mass flywheel and with a variable geometry turbocharger to increase the performance and meet rigorous exhaust emission norms. The drive unit used in the tests was not equipped with a solid particle filter.

The tested 16 valve 1.6 HDi engine has a timing belt which drives one camshaft and the second camshaft receives the drive by means of a chain. The drive system of the research object was modified which enabled noninvasive fuel exchange. The modifications covered: the system of fuel transmission, installation of an additional fuel tank and the vehicle deck computer software. The modifications did not directly interfere with the drive unit structure, but rather its accessories and the software. Adjustments connected with bringing fuel to the engine involved fixing an outside tank and cutting off fuel supply from the pre-installed tank. No additional fuel filters or fuel pump were mounted. The system of fuel supply was connected from the additional tank directly to the drive unit.

The performance parameters of the drive unit powered with mixtures of diesel oil and fatty acid methyl esters were analyzed on a load bearing chassis dynamometer with an electro centrifugal brake, which is presented in fig. 1.



**Fig. 1.** Load bearing chassis dynamometer

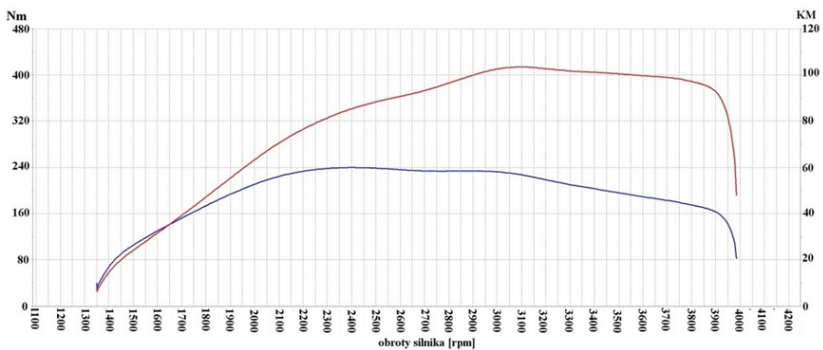
In a load bearing chassis dynamometers the power is transmitted from the car wheels through drive rollers to the brake and the results reflect the operation of the entire drive system. The dynamometer is designed for control and monitoring of power in road transport means and for verification of performance parameters of an engine with fuel injection controller modifications. Technical data concerning the load bearing chassis dynamometer used for the tests are presented in tab. 3.

**Table 3**

**Technical data of a load bearing chassis dynamometer**

Type of measurement	Inertial acceleration mode
	Loading mode, that is, with constant revolutions for different loads
	Brake controlled decelerated mode
Maximal speed	270 km/h
Size of rollers	320 x 600 mm
Size of dynamometer	3500 x 5600 x 350 mm
Mass of dynamometer	2500 kg

The process of testing depends on the scope of the tests and the research goal. The power output and torque of the drive unit were measured for mixtures with different content of diesel oil and fatty acid methyl esters with full loading of the dynamometer. During measurement the vehicle was accelerated up to the speed of 140 km/h. The results were automatically generated in a tabular and graphic form by the software. Direct results displayed in a real time could be observed on the computer screen, those were: the engine rotational speed, driving speed, corrected engine power and corrected torque, loading of the electro centrifugal brake, temperature of air sucked by the engine and water steam pressure in the air. Figure 2 shows exemplary results which were provided from the tests on a load bearing chassis dynamometer.



**Fig. 2.** Exemplary data from a chassis dynamometer displayed in real time

### 3. Analysis of test results

An analysis of the test results included 30 measurements of the drive unit power output and torque, for four tested fuel mixtures. The values of basic statistics are presented in tab. 4.

**Table 4**

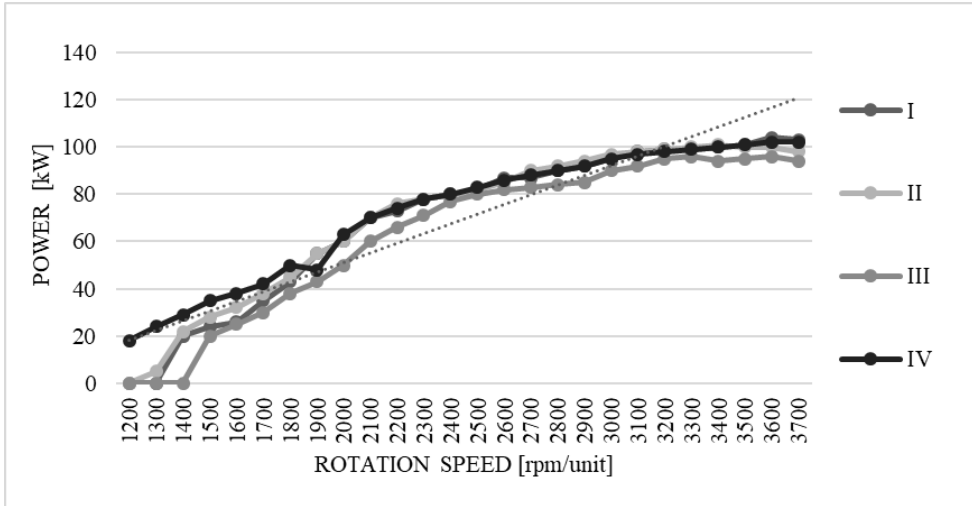
**Values of basic statistics of power output and torque measurement for the testes mixtures**

Mixture number	I	II	III	IV
POWER OUTPUT				
Mean	100.94	101.49	100.15	99.97
Median	100.6	101.6	100.3	100.0
Standard deviation	0.96	0.56	0.83	0.31
Variability coefficient	0.009	0.005	0.008	0.003
Min	99.4	100.4	96.3	99.4
Max	102.8	102.5	100.8	100.4
TORQUE				
Mean	238.88	246.87	233.59	237.26
Median	239.1	247.0	234.35	237.55
Standard deviation	1.56	1.61	2.90	1.26
Variability coefficient	0.006	0.006	0.012	0.005
Min	235.5	244.6	228.3	232.2
Max	241.6	249.4	237.6	238.4

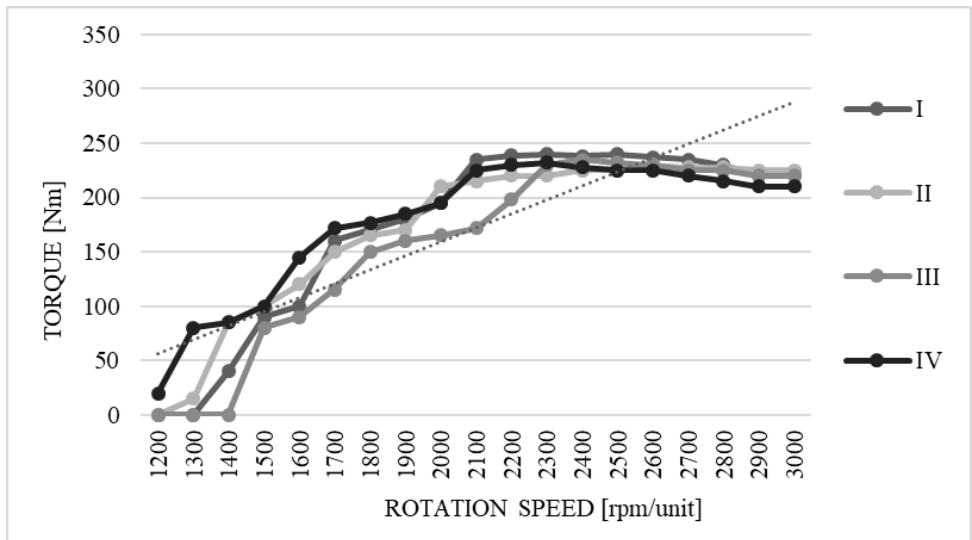
An analysis of the above presented results shows that the mean value and median are statistically significant and they are highest for mixture II as compared to other mixtures. Low variability coefficient that occurs for mixture IV, equal to 0.003 (for power output) is noteworthy. For torque, the highest scatter of values in relation to the mean value, was found for mixture III, which is reflected by standard deviation equal to 2.9.

The test results were referred to the engine rotational speed. They show that a drop in the power output and torque was found for mixture III (70% diesel oil and 30% of fatty acid methyl esters) for the entire range of rotational speeds as compared to mixture I (diesel oil). The differences observed in the power output measurements were statistically significant and varied within the range of 0-10 kW. The highest differences were found for the engine low revolutions (to 1450 rev/min). As regards the results of torque measurements, differences were observed for low engine revolutions (from 1200 rev/min do 1400 rev/min), and their results were statistically significant and ranged from 0 to 20 Nm. The smallest differences in measurement results for torque were found for the engine rotational speed equal to 2300-3000 rev/min., for all the analyzed mixtures.

Application of different fuel mixtures did not have a harmful effect on the drive unit efficiency. The results of tests of diesel oil and fatty acid methyl ester mixtures in comparison with pure diesel oil are satisfying in terms of exhaust emission reduction (the engine ecological operation).



**Fig. 3.** Dependence of power on rotational speed for the analyzed mixtures



**Fig. 4.** Dependence of torque on rotational speed for the analyzed fuel mixtures

The test results were statistically analyzed. Mean values of a sample made up of 120 elements were subject to statistical analysis. The mixtures of diesel oil and fatty acid methyl esters were accepted to be independent variables, whereas the tested performance parameters of the drive unit were dependent variables (power output and torque). A straight of simple linear regression was developed based on the determined estimators. The study provides exemplary regression equations for two fuel mixtures and performance parameters. The tests of power output for mixture II (90% of diesel oil and 10% of fatty acid methyl esters) are described by the following dependence:

$$y = 1.079x + 99.968 \quad (1)$$

Whereas, the correlation coefficient for the above equation was 0.8642, for significance level  $p = 0.0001$ . The tests of torque for mixture IV (50% of diesel oil and 50% of fatty acid methyl esters), for correlation coefficient 0.715 and significance level  $p = 0.0001$ , was described by the following dependence:

$$y = 2.902x + 237.603 \quad (2)$$

The tests were used for determination of usefulness of particular variables in the static model for prediction of dependent variables.

## **4. Conclusions**

The analysis of test results shows that 50% content of fatty acid methyl esters in a diesel oil decreases the engine performance parameters by 2% as compared to pure diesel oil. An increase in the drive unit performance parameters was observed for the mixture of 30% content of fatty acid methyl esters and 70% of diesel oil. The tests were performed for standard settings of the fuel injection controller and provide the basis for verification of performance parameters of an engine powered with mixtures of diesel oil and a biocomponent for an increased fuel dose and air charge.

## **5. References**

1. Asadia A., Zhangb Y., Mohammadi H., Khorand H., Rui Z., Hossein Doranehgard M., Bozorge M.: Combustion and Emission Characteristics of Biomass Derived Biofuel, Premixed in a Diesel Engine: A CFD Study. *Renewable Energy*, Vol. 138, 2019.
2. Baraniak M., Łaczek T.: Low temperature properties of biofuels containing fatty acid methyl esters of animal fat origin. *Oil- Gas*, 2010.



3. Beran E.: Chemical technology – Energy resources and methods. Wrocław University of Technology, 2013.
4. Fontaras G., Karavalakis G., Kousoulidou M., Tzamkiozis T., Ntziachristos L., Bakeas E., Stournas S., Samaras Z.: Effects of Biodiesel on Passenger Car Fuel Consumption, Regulated and Non-Regulated Pollutant Emissions Over Legislated And Real-World Driving Cycles. *Fuel*, Vol. 88, 2009.
5. Gang W., Guohe J., Zhiyuan Y., Zhijian H.: Emission Characteristics for Waste Cooking Oil Biodiesel Blend in a Marine Diesel Propulsion Engine. *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 28, 2019.
6. Jakóbiec J., Baranik M., Duda A.: High quality of fatty acid methyl esters of rape oil is a promotion of car transport. *Archives of Motorization*, Warszawa 2008.
7. Landowski B., Baran M.: Analysis of selected results of engine oil tests. 18<sup>th</sup> International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles, MATEC Web of Conferences, 302, 2019.
8. Markiewicz M., Muślewski Ł., Pająk M.: Impact of Biocomponent Additive to Diesel Oil on Values of Selected Functional Parameters of Transport Means. *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 29, 2020.
9. Markiewicz M., Muślewski Ł.: Survey performance and emission parameters of diesel engine powered by diesel oil and fatty acid methyl esters using fuzzy logic techniques. *Fuel*, Vol. 277, 2020.
10. Markiewicz M., Muślewski Ł.: The impact of powering an engine with fuels from renewable energy sources including its software modification on a drive unit performance parameters. *Sustainability*, Vol. 11, Iss. 23, 2019.
11. Mofijur M., Rasul M., Hyde J., Bhuyia M.: Role of Biofuels on IC Engines Emission Reduction. *Energy Procedia*, Vol. 75, 2015.
12. Radziemska E., Lewandowski W., Szukalska E., Tynek M., Pustelnik A., Ciunel K.: Rape biofuels, preparation of raw material to provide biocomponents under the conditions of an agricultural farm and pilot methanolysis. *Metrologia*, Gdańsk 2009.
13. Struś M.: Efficiency of self-ignition combustion engines powered with bioxdiesel with totally recyclable components. *Machine Engineering*, 2014.
14. Tys J., Piekarski W., Jackowska I., Kaczor A., Zajac G., Starobrat P.: Technological and economic conditionings of rape biofuel production. *Disputes and monographs*, Lublin 2003.

# **ANALIZA WYBRANYCH PARAMETRÓW UŻYTKOWYCH SILNIKA ZS ZASILANEGO MIESZANKAMI OLEJU NAPĘDOWEGO I BIOKOMPONENTU**

## **1. Wprowadzenie**

Stosowanie paliw alternatywnych do zasilania tłokowych silników spalinowych związane jest z wysokim zapotrzebowaniem i zmniejszającymi się zasobami naturalnymi. Najczęściej stosowanymi surowcami do zasilania silników o zapłonie samoczynnym są transestryfikowane oleje roślinne. Surowe oleje roślinne produkowane są przede wszystkim na cele spożywcze, co oznacza, że nie spełniają wymagań normy DIN 51 605 i nie mogą być wykorzystywane jako paliwa do zasilania środków transportu. Najczęściej stosowanym materiałem do produkcji biokomponentów (estrów metylowych kwasów tłuszczowych) jest olej rzepakowy. W ostatniej dekadzie odnotowano znaczny wzrost produkcji rzepaku w Niemczech, Francji i Włoszech oraz na Białorusi i Ukrainie. W Polsce produkcja rzepaku skoncentrowana jest w rejonie Kujaw, Żuław, Pomorza Zachodniego, Olsztyńskiego, Lubelskiego, Opolskiego oraz Wrocławskiego. Na cele energetyczne produkowane są odmiany rzepaku podwójnie ulepszone o niskiej zawartości kwasu erukowego i glukozyolanów [12].

Wykorzystanie oleju rzepakowego w czystej postaci jest niemożliwe w silnikach z zapłonem samoczynnym, z uwagi na ich wysoki współczynnik lepkości. Aby oleje rzepakowe mogły być użyte do zasilania silników spalinowych, należy je zmodyfikować, zmniejszając parametr lepkości poprzez [6]:

- rozcieńczenie oleju roślinnego paliwem pochodzenia naftowego,
- łączenie ich z alkoholami małowcząsteczkowymi,
- destylację lub inne procesy technologiczne,
- reakcję chemiczną prowadzącą do wydzielania estrów (transestryfikację).

Najczęściej stosowanym zabiegiem jest transestryfikacja, czyli reakcja, w wyniku której następuje wymiana glicerolu zawartego w cząsteczce tłuszczu (triacylglicerolu) na małowcząsteczkowe alkohole alifatyczne (metanol, etanol, propanol, butanol) [12]. Proces transestryfikacji prowadzony jest najczęściej w temperaturze 60–70°C w obecności katalizatora zasadowego. Aby osiągnąć wysoki stopień konwersji estrów, stosowany jest

duży nadmiar metanolu, który po zakończeniu procesu transestryfikacji jest oddestylowywany i wraca do procesu [14].

Powstające w tym procesie estry metylowe kwasów tłuszczowych mieszane są z olejem napędowym, powstaje w ten sposób paliwo zastępcze do zasilania silników o zapłonie samoczynnym, potocznie nazywany biodieslem. W odróżnieniu od oleju napędowego, biodiesel jest paliwem nietoksycznym, a jego wykorzystanie powoduje obniżenie emisji szkodliwych substancji do atmosfery [2]. Biodiesel ma lepsze własności smarne niż tradycyjny olej napędowy oraz przedłuża żywotność silnika [3, 13].

Oprócz aspektów ekologicznych środków transportu, istotne znaczenie mają pozostałe kryteria oceny jakości ich funkcjonowania [1, 4, 5, 11], które wyrażane są za pomocą parametrów eksploatacyjnych, w bezpośredni sposób zależnych od zasilającego je paliwa. Najczęściej spotykanymi wskaźnikami pracy jednostek napędowych środków transportu są moc oraz moment obrotowy. W literaturze krajowej i zagranicznej odnaleziono badania dotyczące zasilania silników wysokoprężnych estrami metylowymi kwasów tłuszczowych [8–10, 13]. Eksperymentom badawczym poddawane były takie parametry jak: osiągi silnika, własności ekologiczne, wartość opałowa estrów metylowych kwasów tłuszczowych, gęstość oraz lepkość estrów metylowych kwasów tłuszczowych [4, 5]. Badania wykazały mniejsze osiągi silnika o 7–8% oraz mniejsze spadki mocy silnika w porównaniu do oleju napędowego, w zależności od systemu spalania i własności układu wtryskowego, wskutek niższej wartości opałowej przy jednocześnie wyższym parametrze gęstości estrów metylowych kwasów tłuszczowych.

Celem prowadzonych badań było porównanie mocy oraz momentu obrotowego wybranej jednostki napędowej, zasilanej mieszankami oleju napędowego i estrów metylowych kwasów tłuszczowych. W prowadzonym eksperymencie znaczenie miał skład mieszanki paliwowej, gdyż w dostępnej literaturze istnieje niewiele badań eksploatacyjnych dotyczących mieszanki 50% oleju napędowego i 50% estrów metylowych kwasów tłuszczowych. Nie odnaleziono również badań eksploatacyjnych, które dotyczyłyby mieszanki 50% oleju napędowego i 50% estrów metylowych kwasów tłuszczowych z dodatkiem uszlachetniającym, poprawiającym właściwości fizykochemiczne mieszanki paliwowej.

## **2. Metodyka badań**

Materiałem używanym podczas badań, były oleje roślinne poddane procesowi transestryfikacji, potocznie nazywane są biokomponentami, które mieszane były w różnych proporcjach z olejem napędowym. Mieszanki oleju napędowego i estrów metylowych kwasów tłuszczowych przygotowane zostały w zaplanowanych proporcjach i odpowiednio oznaczone, co przedstawiono w tabeli 1. Dodatkiem uszlachetniającym, który stosowany był w połączeniu z mieszanką 50% oleju napędowego i 50% estrów metylowych kwasów tłuszczowych był środek wzbogacający liczbę cetanową oraz zwiększający właściwości

smarne paliwa. Olej napędowy stosowany w badaniach pochodził bezpośrednio od dostawcy i pozbawiony był dodatku biokomponentu.

**Tabela 1**

**Proporcje mieszanek stosowanych do badań**

Lp.	Skład mieszanki	Oznaczenie mieszanki
1	olej napędowy	mieszanka I
2	90% oleju napędowego i 10% estrów metylowych kwasów tłuszczowych	mieszanka II
3	70% oleju napędowego i 30% estrów metylowych kwasów tłuszczowych	mieszanka III
4	50% oleju napędowego i 50% estrów metylowych kwasów tłuszczowych z dodatkiem uszlachetniającym	mieszanka IV

Dodatkiem uszlachetniającym, który stosowany był w połączeniu z mieszanką 50% oleju napędowego i 50% estrów metylowych kwasów tłuszczowych, był środek wzbogacający liczbę cetanową oraz zwiększający właściwości smarne paliwa. Olej napędowy stosowany w badaniach pochodził bezpośrednio od dostawcy i pozbawiony był dodatku biokomponentu. Właściwości fizykochemiczne stosowanych mieszanek paliwowych przedstawiono w tab. 2.

**Tabela 2**

**Właściwości fizykochemiczne mieszanek stosowanych do badań**

Właściwości	Mieszanka I	Mieszanka II	Mieszanka III	Mieszanka IV	Mieszanka V
Lepkość [mPa*s]	6,46	6,26	7,8	8,56	9,2
Liczba cetanowa	53,33	54,94	55,92	58,40	52,60
Ciepło spalania [J/g]	44277	44379	43139	41770	42917
Wartość opałowa [J/g]	43097	43199	41959	40590	41750

Obiektem badań był silnik o zapłonie samoczynnym z bezpośrednim wtryskiem paliwa realizowanym przy pomocy systemu CommonRail z zastosowanymi wtryskiwaczami elektromagnetycznymi. Badany silnik współpracuje z dwumasowym kołem zamachowym oraz turbosprężarką o zmiennej geometrii łopatek, co wpływa na podniesienie osiągnięć oraz spełnia rygorystyczne normy emisji spalin. Jednostka napędowa, używana w badaniach, nie była wyposażona w filtr cząstek stałych. Badany silnik o oznaczeniu 1.6 HDi w wersji 16-zaworowej ma pasek rozrządu, który napędza jeden wałek rozrządu, a drugi wałek odbiera napęd od pierwszego za pośrednictwem łańcucha. W obiekcie badań

dokonana została adaptacja układu zasilania, co pozwoliło na bezinwazyjną zmianę paliwa zasilającego silnik. Zmiany obejmowały w szczególności: system przekazywania paliwa, instalowanie dodatkowego zbiornika paliwa oraz zmiany w ustawieniach oprogramowania komputera zamontowanego w pojeździe. Modyfikacje wykonywane w pojeździe nie ingerowały bezpośrednio w konstrukcję jego jednostki napędowej, dotyczyły jedynie jego osprzętu oraz oprogramowania. Adaptacje związane z doprowadzeniem paliwa do silnika bazowały na przyłączeniu zewnętrznego zbiornika paliwa, przy jednoczesnym odłączeniu dopływu paliwa z fabrycznego zbiornika. Nie montowano dodatkowych filtrów paliwowych ani pompy paliwowej. System podawania paliwa podłączony został z dodatkowego zbiornika bezpośrednio do jednostki napędowej.

Badania parametrów eksploatacyjnych jednostki napędowej zasilanej mieszankami oleju napędowego i estrów metylowych kwasów tłuszczowych wykonywane były na obciążeniowej hamowni podwoziowej z hamulcem elektrowirowym, przedstawionej na rys. 1.



**Rys. 1.** Obciążeniowa hamownia podwoziowa

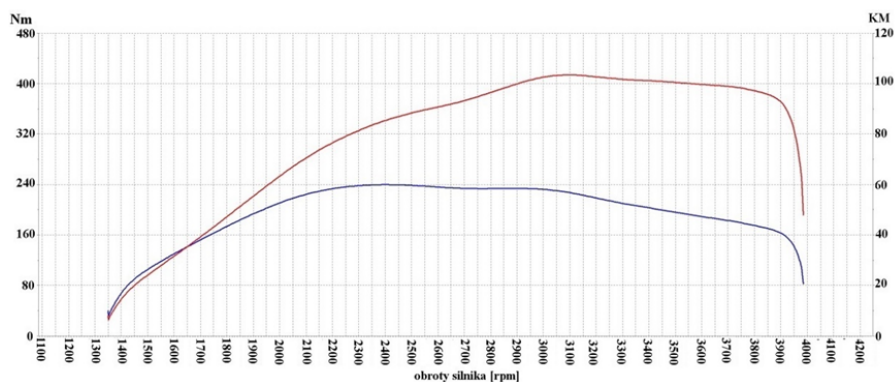
W hamowniach podwoziowych obciążeniowych napęd z kół samochodu przekazywany jest przez rolki jezdne do hamulca, a uzyskiwane wyniki dotyczą pracy całego układu napędowego. Wykorzystywana w badaniach hamownia przeznaczona jest do kontroli i sprawdzania mocy w środkach transportu drogowego oraz weryfikacji parametrów eksploatacyjnych silnika, w którym dokonywane były zmiany ustawienia sterownika wtrysku paliwa. Dane techniczne dotyczące obciążeniowej hamowni podwoziowej wykorzystywanej do badań przedstawiono w tab. 3.

Tabela 3

**Dane techniczne obciążeniowej hamowni podwoziowej**

Rodzaj pomiaru	Bezwładnościowy tryb przyspieszeniowy
	Tryb obciążeniowy tj. ze stałymi obrotami dla różnych obciążeń
	Kontrolowany hamulcem tryb przyspieszeniowy
Prędkość maksymalna	270 km/h
Rozmiar rolek	320 x 600 mm
Rozmiar hamowni	3500 x 5600 x 350 mm
Masa hamowni	2500 kg

Przebieg realizacji badań uzależniony jest od ich zakresu oraz od ustalonego celu badawczego. W przypadku pomiaru mocy użytecznej i momentu obrotowego jednostki napędowej zasilanej mieszanką o różnej zawartości oleju napędowego i estrów metylowych kwasów tłuszczowych badania prowadzone były pod pełnym obciążeniem. Podczas pomiaru pojazd zamontowany na hamowni rozpędzany był do prędkości 140 km/h. Uzyskane wyniki pomiarów zostały przez oprogramowanie wygenerowane automatycznie w postaci tabelarycznej oraz graficznej. Bezpośrednie wyniki, wyświetlane w czasie rzeczywistym, obserwować można było na ekranie komputera. Były to: prędkość obrotowa silnika, prędkość jazdy, skorygowana moc silnika oraz skorygowany moment obrotowy, obciążenie hamulca elektrowirowego, temperatura powietrza zasysanego przez silnik oraz ciśnienie pary wodnej w powietrzu. Na rys. 2 przedstawiono przykładowe wyniki, które uzyskuje się podczas badań na obciążeniowej hamowni podwoziowej.



Rys. 2. Przykładowe dane z hamowni podwoziowej wyświetlane w czasie rzeczywistym

### 3. Analiza wyników badań

Analiza wyników badań dotyczyła 30 pomiarów mocy użytecznej oraz momentu obrotowego jednostki napędowej dla czterech badanych mieszanek paliwowych. Wartości podstawowych statystyk przedstawiono w tab. 4.

**Tabela 4**

#### Wartości podstawowych statystyk pomiaru mocy i momentu obrotowego dla badanych mieszanin

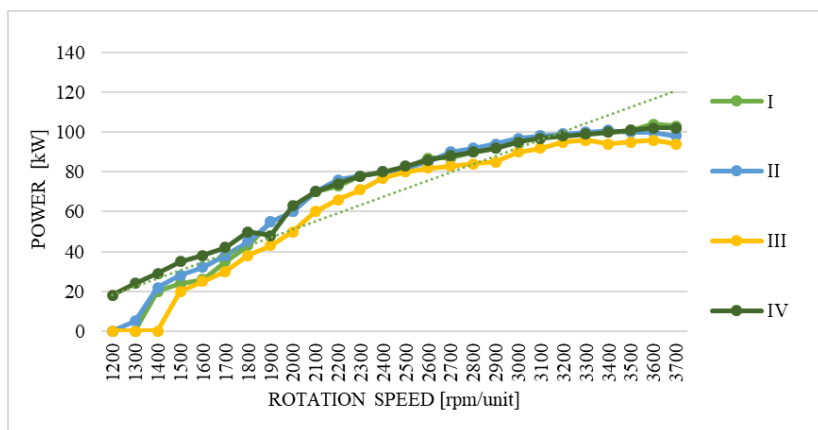
Numer mieszanki	I	II	III	IV
<b>MOC UŻYTECZNA</b>				
Średnia	100,94	101,49	100,15	99,97
Mediana	100,6	101,6	100,3	100,0
Odchylenie standardowe	0,96	0,56	0,83	0,31
Współczynnik zmienności	0,009	0,005	0,008	0,003
Min.	99,4	100,4	96,3	99,4
Max.	102,8	102,5	100,8	100,4
<b>MOMENT OBROTOWY</b>				
Średnia	238,88	246,87	233,59	237,26
Mediana	239,1	247,0	234,35	237,55
Odchylenie standardowe	1,56	1,61	2,90	1,26
Współczynnik zmienności	0,006	0,006	0,012	0,005
Min.	235,5	244,6	228,3	232,2
Max.	241,6	249,4	237,6	238,4

Analizując powyższe wyniki, stwierdzić można, że wartość średnia i mediana są istotne statystycznie i najwyższe dla mieszanki II w porównaniu z innymi mieszankami. Na uwagę zasługuje również niski współczynnik zmienności występujący dla mieszanki IV, wynoszący 0,003 (dla mocy użytecznej). Dla momentu obrotowego największy rozrzut wartości w stosunku do średniego wyniku uzyskano dla mieszanki III, o czym stanowi wynik odchylenia standardowego wynoszący 2,9.

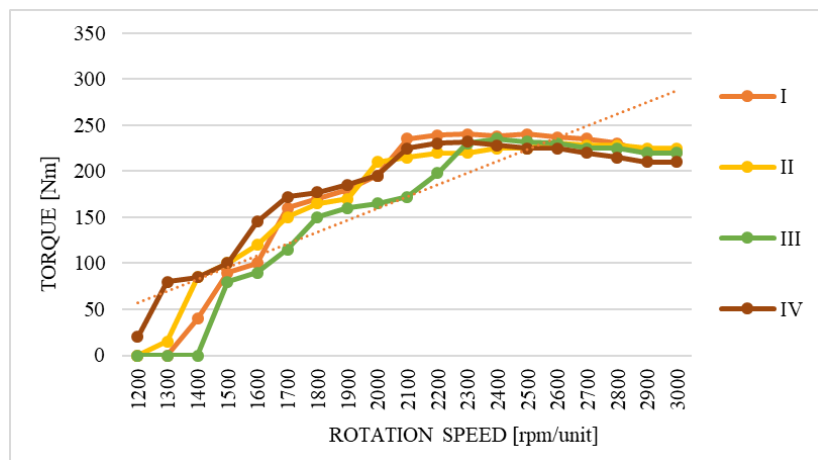
Przedstawione badania prowadzone były w zależności od prędkości obrotowej silnika. Na ich podstawie stwierdzono, że przy zasilaniu mieszanką III (70% oleju napędowego i 30% estrów metylowych kwasów tłuszczowych) nastąpił spadek mocy oraz momentu obrotowego w prawie całym zakresie prędkości obrotowych w stosunku do mieszanki I (oleju napędowego). Zaobserwowane różnice pomiaru mocy użytecznej były istotne statystycznie i zmieniały się w zakresie 0–10 kW. Największe różnice zauważalne były dla niskich obrotów silnika (do 1450 obr/min). W przypadku pomiaru momentu obrotowego różnice zauważalne były w zakresie niskich obrotów silnika (od 1200 obr/min do 1400 obr/min), a ich wyniki były

istotne statystycznie i wahały się od 0 do 20 Nm. Najmniejsze różnice w wynikach pomiaru momentu obrotowego pomiędzy wszystkimi badanymi mieszankami występowały w zakresach prędkości obrotowej silnika 2300–3000 obr/min.

Zmiana mieszanki paliwowej nie wpłynęła niekorzystnie na efektywność pracy jednostki napędowej. Uzyskane wyniki badań dla mieszanek oleju napędowego i estrów metylowych kwasów tłuszczowych względem czystego oleju napędowego są zadowalające z punktu widzenia obniżenia składników spalin (ekologicznej pracy silnika).



Rys. 3. Zależność mocy od prędkości obrotowej dla badanych mieszanek paliwowych



Rys. 4. Zależność momentu obrotowego od prędkości obrotowej dla wybranych mieszanek paliwowych

Uzyskane wyniki badań poddane zostały analizie statystycznej. W badaniach statystycznych analizie poddano wartości średnie 120-elementowej próby. Jako zmienne niezależne przyjęto mieszanki oleju napędowego i estrów metylowych kwasów tłuszczo-



wych, zaś zmiennymi zależnymi były badane parametry użytkowe jednostki napędowej (moc użyteczna oraz moment obrotowy). Na podstawie wyznaczonych estymatorów oszacowano prostą regresji liniowej jednoczynnikowej. W pracy przedstawiono przykładowe równania regresji dla dwóch mieszanek paliwowych i badanych parametrów użytkowych. Badanie mocy użytecznej dla mieszanki II (90% oleju napędowego i 10% estrów metylowych kwasów tłuszczowych) opisano zależnością:

$$y = 1,079x + 99,968 \quad (1)$$

Przy czym współczynnik korelacji dla powyższego równania wynosił 0,8642, przy poziomie istotności  $p = 0,0001$ . Badanie momentu obrotowego dla mieszanki IV (50% oleju napędowego i 50% estrów metylowych kwasów tłuszczowych), przy współczynniku korelacji 0,715 i poziomie istotności  $p = 0,0001$ , opisano zależnością:

$$y = 2,902x + 237,603 \quad (2)$$

Przeprowadzone badania posłużyły do określenia przydatności poszczególnych zmiennych w modelu statystycznym do przewidywania zmiennych zależnych.

## 4. Wnioski

Przeprowadzona analiza wyników badań wykazała, że 50% udziału estrów metylowych kwasów tłuszczowych w oleju napędowym obniża parametry eksploatacyjne silnika o ok. 2% względem oleju napędowego. Zauważalny wzrost parametrów eksploatacyjnych jednostki napędowej środka transportu zaobserwowano dla mieszanki 30% estrów metylowych kwasów tłuszczowych i 70% oleju napędowego. Badania prowadzone były dla standardowych ustawień sterownika wtrysku paliwa i ich wyniki są podstawą do weryfikacji parametrów eksploatacyjnych silnika zasilanego mieszankami oleju napędowego i biokomponentu, przy zwiększaniu dawki paliwa oraz doładowania powietrza jednostki napędowej.

## 5. Literatura

1. Asadia A., Zhangb Y., Mohammadi H., Khorand H., Rui Z., Hossein Doranehgard M., Bozorge M.: Combustion and Emission Characteristics of Biomass Derived Biofuel, Premixed in a Diesel Engine: A CFD Study. *Renewable Energy*, Vol. 138, 2019.
2. Baraniak M., Łaczek T.: Low temperature properties of biofuels containing fatty acid methyl esters of animal fat origin. *Oil- Gas*, 2010.

3. Beran E.: Chemical technology – Energy resources and methods. Wrocław University of Technology, 2013.
4. Fontaras G., Karavalakis G., Kousoulidou M., Tzankiozis T., Ntziachristos L., Bakeas E., Stournas S., Samaras Z.: Effects of Biodiesel on Passenger Car Fuel Consumption, Regulated and Non-Regulated Pollutant Emissions Over Legislated And Real-World Driving Cycles. *Fuel*, Vol. 88, 2009.
5. Gang W., Guohe J., Zhiyuan Y., Zhijian H.: Emission Characteristics for Waste Cooking Oil Biodiesel Blend in a Marine Diesel Propulsion Engine. *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 28, 2019.
6. Jakóbiec J., Baranik M., Duda A.: High quality of fatty acid methyl esters of rape oil is a promotion of car transport. *Archives of Motorization*, Warszawa 2008.
7. Landowski B., Baran M.: Analysis of selected results of engine oil tests. 18th International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles, MATEC Web of Conferences, 302, 2019.
8. Markiewicz M., Muślewski Ł., Pająk M.: Impact of Biocomponent Additive to Diesel Oil on Values of Selected Functional Parameters of Transport Means. *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 29, 2020.
9. Markiewicz M., Muślewski Ł.: Survey performance and emission parameters of diesel engine powered by diesel oil and fatty acid methyl esters using fuzzy logic techniques. *Fuel*, Vol. 277, 2020.
10. Markiewicz M., Muślewski Ł.: The impact of powering an engine with fuels from renewable energy sources including its software modification on a drive unit performance parameters. *Sustainability*, Vol. 11, Iss. 23, 2019.
11. Mofijur M., Rasul M., Hyde J., Bhuyia M.: Role of Biofuels on IC Engines Emission Reduction. *Energy Procedia*, Vol. 75, 2015.
12. Radziemska E., Lewandowski W., Szukalska E., Tynek M., Pustelnik A., Ciunel K.: Rape biofuels, preparation of raw material to provide biocomponents under the conditions of an agricultural farm and pilot methanolysis. *Metrologia*, Gdańsk 2009.
13. Struś M.: Efficiency of self-ignition combustion engines powered with bioxdiesel with totally recyclable components. *Machioine Engineering*, 2014.
14. Tys J., Piekarski W., Jackowska I., Kaczor A., Zajac G., Starobrat P.: Technological and economic conditionings of rape biofuel production. *Disputes and monographs*, Lublin 2003.