

STUDY OF PHYSICAL PROPERTIES OF WASTE NATURAL FATS AND THEIR IMPACT ON TRACTOR ENGINE PERFORMANCE

Summary

The aim of this work was the comparison of physical properties of waste cooking oil (WCO), mix of waste animal and vegetable fats (WFO), pure rapeseed oil (RO) and determine the influence of these materials as a fuel on engine performance. The agriculture tractor ZETOR 5211 connected to engine brake was used in this test. Control test was made on diesel fuel (ON). In first stage of research the dynamic viscosity and density in the range of temperature of materials used to this study was determined. Power and unit fuel consumption in rpm engine between 1000-2300 was determined. Parameters like density and viscosity of materials used to study were similar to diesel fuel in 65-70°C. The engine fueled with WCO and WFO generated power about 2 kW lower than fueled with diesel fuel, furthermore unit fuel consumption increase about 16%.

Key words: natural fats; vegetable oils; biofuels; viscosity; density; diesel engines; tractors; experimentation

BADANIE PARAMETRÓW FIZYCZNYCH ZUŻYTYCH TŁUSZCZÓW NATURALNYCH I ICH WPŁYW NA PARAMETRY PRACY SILNIKA CIĄGNIKA ROLNICZEGO

Streszczenie

Celem pracy było porównanie właściwości fizycznych odpadowego oleju roślinnego (WCO), zużytej mieszaniny tłuszczów zwierzęcych i roślinnych (WFO), rafinowanego oleju rzepakowego (RO), oraz wpływu ich zastosowania jako paliw na parametry pracy silnika wysokoprężnego. W badaniach punktem odniesienia były parametry osiągnięte dla oleju napędowego (ON). Badania prowadzono na ciągniku rolniczym ZETOR model 5211 obciążanym poprzez wał odbioru mocy (WOM) za pomocą hamulca silnikowego. Zakres badań obejmował pomiar lepkości dynamicznej i gęstości paliw w funkcji temperatury, momentu obrotowego silnika i ogólnego zużycia paliwa. Określono moc i jednostkowe zużycie paliwa w zakresie obrotowym silnika 1000-2300 obr min⁻¹. Z badań wynika, że parametry paliw pochodzenia roślinnego i zwierzęcego są zbliżone do parametrów ON w temperaturze 65-70°C. Zasilany nimi silnik generuje moc niższą o 2 kW, czemu towarzyszy wzrost jednostkowego zużycia paliwa o 16% w stosunku do wartości uzyskanych dla zasilania olejem napędowym.

Słowa kluczowe: tłuszcze naturalne; olej roślinny; biopaliwa; lepkość; gęstość; silniki wysokoprężne; ciągniki; badania

1. Wstęp

Proces mechanizacji rolnictwa doprowadził do sytuacji, w której producenci rolni są uzależnieni od ciągłych dostaw oleju napędowego, który staje się produktem deficytowym. W środkowej Europie prowadzone są badania nad możliwościami zastąpienia oleju napędowego olejem rzepakowym, co jest działaniem uzasadnionym zarówno w aspekcie ekonomicznym jak i technicznym [1]. Warunkiem stosowania oleju roślinnego do silnika z zapłonem samoczynnym (ZS) jest jego wcześniejsze przystosowanie pod kątem parametrów fizykochemicznych. Hemmerlein i in. [2] w 1991 roku dowiedli, że stosowanie oleju rzepakowego zależy od konstrukcji silnika ZS. Silniki ZS ze wstępną komorą spalania wykazywały większą odporność na negatywne oddziaływania oleju rzepakowego niż silniki z wtryskiem bezpośrednim. Wpływ na to zjawisko miały powstające nagary w komorze spalania i na końcówkach wtryskiwaczy.

Znane są rozwiązania, które umożliwiają stosowanie surowego oleju rzepakowego do każdego silnika ZS stosowanego w ciągnikach rolniczych i wciąż prowadzone są prace nad ich wdrożeniem [3]. Czechłowski i in. [4] nie dowiedli negatywnego oddziaływania oleju rzepakowego na elementy robocze pomp wtryskowych w ciągnikach star-

szej generacji. Rathbauer i in. [5] na 38 pojazdach rolniczych przystosowanych do oleju rzepakowego badali oddziaływania paliwa podczas 5-letniego okresu eksploatacji. Na podstawie ich badań stwierdzono, że zbyt duży udział oleju rzepakowego w olejach smarujących prowadził do jego pirolizy. Pasyniuk i Golimowski badając prototypową wersję ciągnika rolniczego przygotowanego fabrycznie do oleju rzepakowego dowiedli, że stosowanie oleju rzepakowego wpływa na spadek mocy o ok. 15% [6, 7].

Z uwagi na właściwości reologiczne oleju rzepakowego, stosowanie go w czystej postaci jako paliwa jest możliwe w wyższych temperaturach lub po jego modyfikacji chemicznej, w której efekcie lepkość jest zbliżona do oleju napędowego. W wyniku badań zmiany lepkości w gradientie temperatury tłuszczów roślinnych i zwierzęcych oraz estrów z nich otrzymanych dowiedziono, że w temperaturach powyżej 60°C lepkość tłuszczów jest zbliżona względem siebie i bliska estrom metylowym z nich powstałym, a tym samym zbliżona do oleju napędowego w niskich temperaturach [8]. Zjawisko to pozwala nawet na zastosowanie w czystej postaci podgrzanych tłuszczów zwierzęcych jako paliwa [9].

Lepkość można zredukować chemicznie, przez poddanie tłuszczów reakcji estryfikacji. Powstający produkt charakteryzuje się zbliżonymi właściwościami do oleju napę-

dowego i może być otrzymywany z różnego rodzaju tłuszczów [10]. W Europie środkowej olej rzepakowy jest najpopularniejszym surowcem do produkcji biopaliw, a także tłuszczem spożywczym. Jego dwukierunkowe wykorzystanie przyczynia się pośrednio do gwałtownego wzrostu kosztów żywności. Zdając sobie sprawę z tego faktu, zaczęto prowadzić pracę nad biopaliwami wytwarzanymi z tłuszczów odpadowych [11]. W oparciu o opracowaną przez Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych w Poznaniu technologię estryfikacji niskotemperaturowej podjęto próbę otrzymania biopaliw z olejów posmażalniczych [12, 13]. W dalszych badaniach potwierdzono wysoką jakość tych paliw [14].

Zgodnie z literaturą, do zasilania silnika wysokoprężnego nadają się surowe tłuszcze oraz powstałe z nich estry metylowe. Brakuje natomiast wiedzy na temat oddziaływania surowych olejów odpadowych na pracę silnika ZS, będącego jednostką napędową ciągnika rolniczego. Celem podjętych badań było określenie lepkości dynamicznej i gęstości olejów odpadowych i tłuszczów posmażalniczych, w literaturze zwanych tłuszczami żółtymi i brązowymi [15], a także zbadanie parametrów pracy silnika spalinowego zasilanego tymi tłuszczami.

2. Metodyka badań

Badania prowadzono przy użyciu: odpadowego oleju roślinnego (WCO), zużytej mieszaniny tłuszczów zwierzęcych i roślinnych (WFO) i rafinowanego oleju rzepakowego (RO). Surowy materiał WCO i WFO w ilości wystarczającej na wykonanie całego cyklu badań poddany był procesowi filtracji. Proces ten wykonany był w oparciu o własną metodę, w specjalnej, skonstruowanej do tego celu instalacji. Proces filtracji składał się z filtracji wstępnej i precyzyjnej. W pierwszym etapie filtracji olej został podgrzany do temperatury 50°C i wprowadzony do płóciennego filtra rękawowego, następnie podgrzany do temperatury 90°C i wprowadzony do filtra precyzyjnego składającego się z filtra odśrodkowego i standardowego filtra paliwa o prze-grodzie z bibuły filtracyjnej (rys. 1).



Rys. 1. Instalacja do filtrowania zużytego oleju własnego pomysłu
Fig. 1. Own concept of the installation for waste oil filtration

Badania prowadzono dwuetapowo, pierwszy etap został zrealizowany w laboratorium, następny na przygotowanym do tego celu stanowisku doświadczalnym. Pomiar gęstości

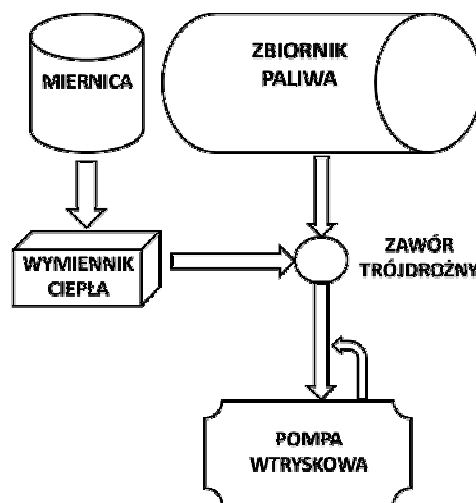
oraz lepkości dynamicznej był wykonywany co 10°C w zakresie temperatur 20-80°C z dokładnością do ±1°C. Pomiar gęstości wykonano przy użyciu densymetru zanurzonego w oleju, w cylindrze miarowym. Cylinder był umieszczony w łaźni wodnej, sterowanej termostatem z dokładnością do ±0,1°C. Pomiar lepkości dynamicznej wykonano używając wiskozymetru rotacyjnego RV dodatkowo wyposażonego w płaszcz wodny. Na podstawie wykonanych badań została określona temperatura, przy której badane parametry będą zbliżone do parametrów oleju napędowego.

Stanowisko doświadczalne składało się z ciągnika rolniczego ZETOR 5211 podłączonego przez wał odbioru mocy (WOM) do hydraulicznego hamulca silnikowego typu H2, system Junkersa. Chwilowe zużycie paliwa mierzono za pomocą komputera pokładowego LH 5000, w który był wyposażony ciągnik. Dodatkowo ciągnik wyposażony został w miernicę do pomiaru zużycia paliwa, która w tym przypadku służyła jako drugi zbiornik paliwa, który wypełniany był każdorazowo badanym olejem. Dane badanego silnika zostały przedstawione w tab.

Tab. Dane silnika użytego do badań
Table. Specification of engine used in this study

Nazwa parametru	Wartość
Model	Z 5201
Typ	wolnossący
System chłodzenia	chłodzony wodą
Liczba cylindrów	3
Pojemność	2696,5 cm ³
Moc znamionowa	33,1 KW/45KM
Znamionowa prędkość obrotowa	2200 obr min ⁻¹
Maksymalny moment obrotowy	160,83 Nm przy 1500 obr min ⁻¹
Stopień sprężania	17
Jednostkowe zużycie paliwa	251 g kWh ⁻¹

Pomiar parametrów pracy silnika odbywał się zgodnie z przyjętą metodą. Silnik, zasilony olejem napędowym ze zbiornika głównego był rozgrzewany do temperatury min. 74°C (mierzono temperaturę oleju silnikowego za pomocą sondy umieszczonej na miejscu bagnetu do kontroli stanu oleju). Po osiągnięciu żądanej temperatury do układu paliwowego wprowadzono próbę badanego oleju z miernicy przez wymiennik ciepła zasilany cieczą z układu chłodzenia silnika (rys. 2).



Rys. 2. Schemat blokowy układu paliwowego badanego ciągnika
Fig. 2. Diagram of fuel system of tested tractor

Badane próbki oleju były podgrzane w wymienniku ciepła do temperatury $75^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, a następnie wprowadzone do układu paliwowego ciągnika (pomiaru temperatury wykonywany był bezpośrednio przed pompą wtryskową). Pomiar badanych parametrów pracy silnika odbywał się w zakresie prędkości obrotowych silnika 1000-2300 obr min^{-1} . Punkty pomiarowe wyznaczano co 200 obr $\text{min}^{-1} \pm 20$ obr min^{-1} począwszy od 2200 obr min^{-1} . Procedura każdego wykonywanego pomiaru składała się z następujących czynności: dźwignię przyspieszacza ręcznego ustawiono w skrajnym położeniu, silnik osiągał maksymalną prędkość obrotową a następnie poprzez zwiększenie momentu obrotowego wytwarzanego przez hamulec zmieniano prędkość obrotową silnika. Osiągając prędkość obrotową odpowiadającą poszczególnym punktom pomiarowym zaprzestawano zwiększać oporu moment hamujący. Dla każdego z punktów pomiarowych szczytywno moment obrotowy M_o , z układu pomiarowego hamulca, chwilowe zużycie paliwa G . W trakcie wykonywanego pomiaru jednorazowo zmierzono ciśnienie atmosferyczne i temperatura powietrza. Na podstawie zabranych wyników wyznaczono krzywą momentu i mocy silnika N , zmianę chwilowego i jednostkowego zużycia paliwa g_e .

3. Wyniki badań

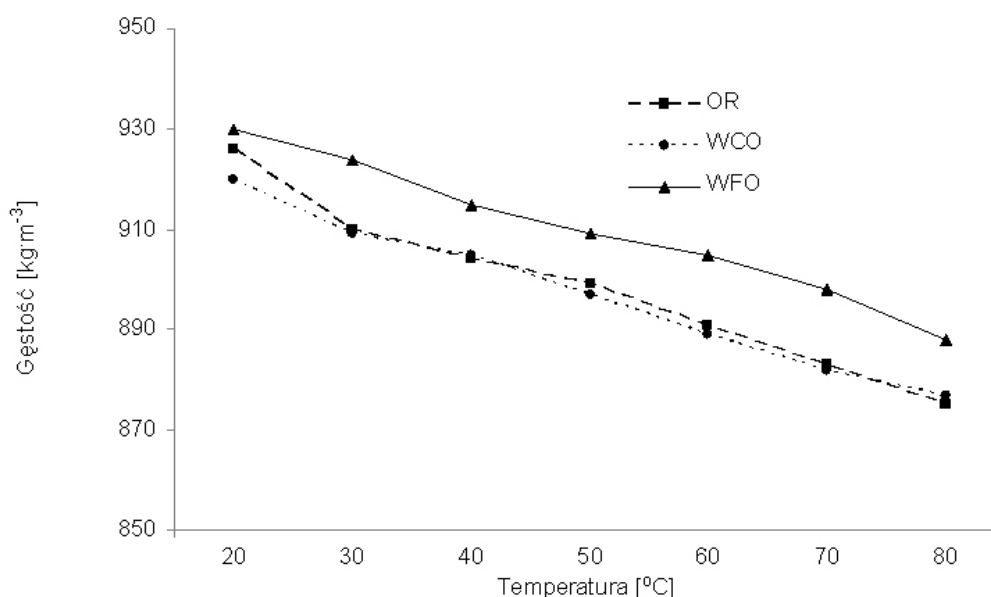
Gęstość rafinowanych olejów roślinnych, zgodnie z przyjętymi standardami, mierzona w temperaturze 15°C , wynosi około 920 kg m^{-3} [16]. Wzrost aktywności cząstek, spowodowany doprowadzoną do oleju energią cieplną, wpływa na spadek gęstości wraz ze wzrostem temperatury. Na podstawie analizy porównawczej tłuszczów, które uprzednio zostały poddane smażeniu w różnych temperaturach dowiedziono, że proces ten miał wpływ na parametr gęstości (rys. 3).

Większa o średnio o 10 kg m^{-3} gęstość WFO względem pozostałych olejów wynika z mniejszego udziału cząstek lotnych, które odparowały podczas procesów kilkukrotnego smażenia, jaki wcześniej został poddany WFO. W wyniku smażenia w temperaturze 190°C części lotne, tj.: węglowo-

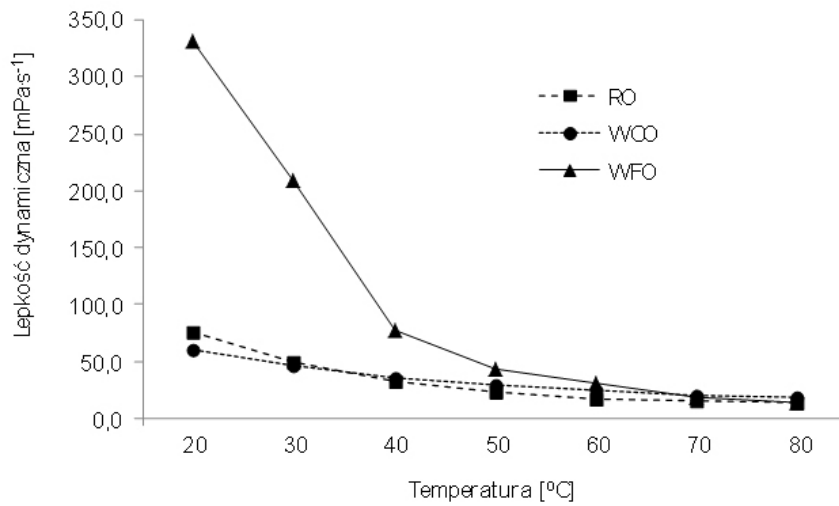
dory, ketony, aldehydy, alkohole, estry, laktony zostają odparowane, w wyniku czego zwiększony zostaje udział cząstek nielotnych, które charakteryzują się większą masą cząsteczkową [17]. Proces ten wpłynął pośrednio również na lepkość dynamiczną WFO (rys. 4). W wyniku przeprowadzonych badań zaobserwowano, że przebieg krzywej lepkości dynamicznej WFO poniżej temperatury 60°C różni się od pozostałych badanych olejów. Poniżej 40°C nastąpił gwałtowny przyrost lepkości wraz ze spadkiem temperatury, co wskazywało na wysoki udział kwasu stearynowego $\text{C}_{18:0}$ i oleinowego $\text{C}_{18:1}$, których temperatura krzepnięcia wynosi odpowiednio ok. 70°C i 44°C [18]. Podwyższony udział tych kwasów tłuszczowych względem pozostałych tłuszczów spowodowany był nasyceniem tłuszczów wodorem podczas smażenia oraz udziałem tłuszczów zwierzęcych, które składają się głównie z tych kwasów.

Golimowski i in. [8] prowadzili podobne badania na tłuszczach zwierzęcych, oleju rzepakowym i oleju posmażalniczym WFO. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzili, że oleje posmażalnicze charakteryzują się wyższą lepkością względem oleju rzepakowego, natomiast krzywa lepkości tłuszczów zwierzęcych w tych samych temperaturach, co w opisywanych badaniach, odbiegała znacząco od pozostałych badanych olejów. Na podstawie dotychczas prowadzonych badań można stwierdzić, że niezależnie od pochodzenia, badane tłuszcze powyżej temperatury 80°C cechowały się zbliżoną lepkością, wynoszącą około $17 \text{ mPa s}^{-1} \pm 3 \text{ mPa s}^{-1}$. Wartość ta jest pięciokrotnie wyższa niż oleju napędowego w temperaturze 40°C . W wyniku podgrzewania oleju o 60 K lepkość dynamiczna spadła średnio o 40 mPa s^{-1} w przypadku RO i WCO i o 300 mPa s^{-1} w przypadku WFO.

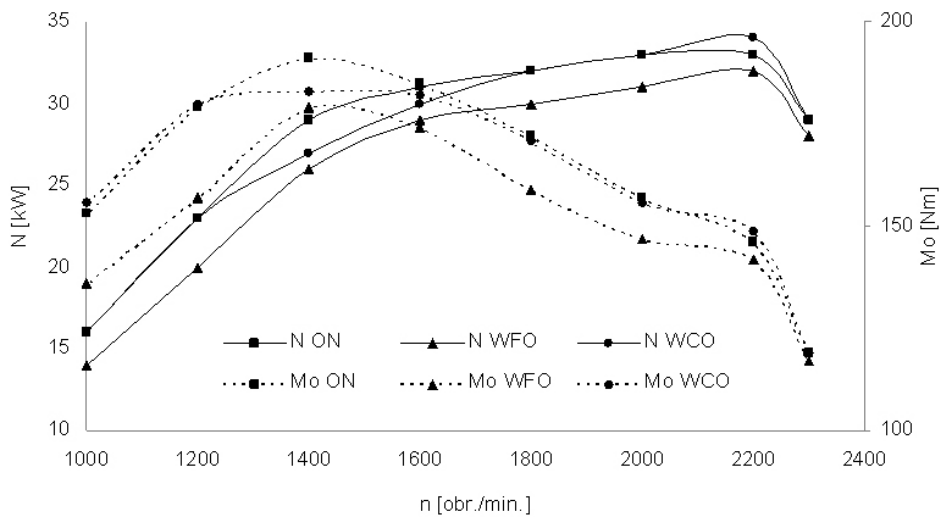
Z uwagi na zbliżone parametry fizyczne RO i WCO do badań prowadzonych na silniku ZS nie użyto RO. Na rys. 5 i 6 przedstawiono parametry pracy silnika ZS, zasilanego badanymi olejami. Ze względu na charakter porównawczy badań, pomiar kontrolny wykonano zgodnie z przyjętą metodyką na oleju napędowym (ON).



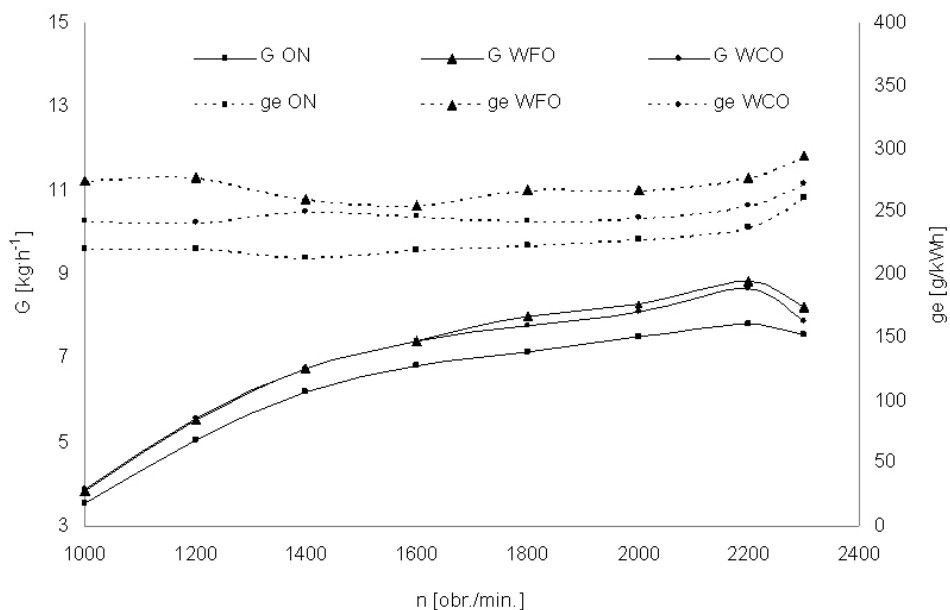
Rys. 3. Gęstość WCO, WFO, RO w funkcji temperatury
Fig. 3. Density of WCO, WFO, RO in the range of temperature



Rys. 4. Lepkość dynamiczna WCO, WFO, RO w funkcji temperatury
 Fig. 4. Dynamic viscosity of WCO, WFO, RO in the range of temperature



Rys. 5. Charakterystyka momentu i mocy badanego silnika zasilonego ON, WFO, WCO
 Fig. 5. Characteristic of torque and power of tested engine fueled with ON, WFO, WCO



Rys. 6. Charakterystyka chwilowego i jednostkowego zużycia paliwa silnika zasilonego ON, WCO, WFO
 Fig. 6. Characteristic of overall and unitary fuel consumption of tested engine fueled with ON, WFO, WCO

Wykazano niewielki wpływ oleju WCO na charakterystykę pracy silnika, w odniesieniu do parametrów pracy na oleju napędowym. Natomiast silnik zasilany WFO generował moc średnio o 2 kW niższą niż w przypadku pozostałych paliw, co wynikało z niższego średnio o 10 Nm momentu obrotowego. Przyczyną tego zjawiska jest mniejszy udział substancji lotnych, które powodują interferencję reakcji przedplamiennych. Nieznaczny spadek mocy przy stosowaniu WCO spowodowany był również samą budową chemiczną olejów, które zawierają w cząsteczkach ok. 11% tlenu, co wpływa na ich niższą wartość opałową [19].

Na podstawie analizy jednostkowego zużycia paliwa stwierdzono, że badany silnik zasilany ON cechował się średnim jednostkowym zużyciem paliwa na poziomie 228 g/kWh, natomiast w przypadku stosowania WCO i WFO średnia wartość jednostkowego zużycia wynosiła odpowiednio 250 i 272 g kWh⁻¹.

WFO zawiera w swoim składzie oleje roślinne jak również tłuszcze zwierzęce. Substancja ta w temperaturze powyżej 60°C cechuje się właściwościami fizycznymi zbliżonymi do oleju napędowego, jednak odbiega znacząco pod kątem budowy fizykochemicznej. Poza ich gorszą lotnością, paliwa pochodzenia organicznego mają skłonność do polimeryzacji, posiadają mniejszą stabilność termiczną, w wyniku czego mogą się pojawiać osady węglowe na elementach aparatów wtryskowych [4, 19]. Długotrwała eksploatacja ciągnika rolniczego zasilanego tego rodzaju paliwami może zakończyć się poważną awarią silnika, spowodowaną polimeryzacją olejów w misce olejowej i powstającymi nagarami w komorze spalania [2, 5]. Zbadanie tego zjawiska wymaga kontynuacji podjętych badań.

4. Wnioski

1. Parametry fizyczne, tj. gęstość i lepkość WCO i WFO, różnią się znacząco od powszechnie stosowanego oleju napędowego. Zastosowanie ich jako paliwa w czystej postaci do zasilania ciągnika rolniczego jest możliwe przez wprowadzenie ich w temperaturę min. 70°C do układu paliwowego.
2. Ciągnik zasilony WFO generował moc średnio o 2 kW, tj. o około 6% niższą niż zasilany olejem napędowym i WCO.
3. Średnie jednostkowe zużycie paliwa badanego silnika wynosiło: 228 g kWh⁻¹ zasilanego ON, 250 g kWh⁻¹ WCO i 272 g kWh⁻¹ WFO. Wzrost jednostkowego zużycia paliwa spowodowany był różnicą w budowie molekularnej tłuszczów i oleju napędowego oraz zwiększonym udziałem części nielotnych w WFO.

5. Bibliografia

- [1] Pasyniuk P.: Olej roślinny jako alternatywne paliwo silnikowe w rolnictwie zrównoważonym – aspekt ekonomiczny. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 2009, nr 1, s. 94-103.
- [2] Hemmerlein N., Korte V., Richter H., Schroeder G.: Performance, exhaust emissions and durability of modern diesel engines running on rapeseed oil. *SAE Technical Papers Series*, 910848, 1991.
- [3] 2ndVegOil projekt 7. Programu Ramowego Nr TREN/FP7/219004.
- [4] Czechowski M., Krysztofiak A., Adamski M., Antczak W.: Wpływ stosowania oleju rzepakowego jako paliwa na trwałość aparatury wtryskowej silników ZS. *Inżynieria Rolnicza*, 2006, nr 12, s. 85-92.
- [5] Rathbauer J., Krammer K., Kriechbaum T., Prankl H., Breinesberger J.: Rapsöl als Treibstoffalternative für die Landwirtschaft BMLFUW-LE.1.3.2/0037-II/1/2006. Forschungsprojekt No. 1337.
- [6] Pasyniuk P., Golimowski W.: Work indicators test for prototype John Deere 6830 agricultural tractor fueled with pure vegetable oil. *Technical Sciences*, 2011, vol. 14(1), s. 109-117.
- [7] Pasyniuk P., Golimowski W.: Effect of rapeseed oil on the parameters of a diesel engine of John Deere tractor, model 6830. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2011, vol. 56(2), s. 118-121.
- [8] Golimowski W., Golimowska R., Kliber A.: Temperature effect on kinematics viscosity of animal fats, vegetable oils and its transesterification product. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2011, vol. 56(1), s. 50-55.
- [9] Kumar M.S., Kerihuel A., Belletre J., Tazerout M.: Experimental investigations on the use of preheated animal fat as fuel in a CI engine. *Renewable Energy*, 2005, 30: 1443-1456.
- [10] Vyas A. P., Verma J. L., Subrahmanyam N.: Review on FAME production processes. *Fuel*, 2010, 89, s. 1-9.
- [11] Bao-Xiang Peng, Qing Shu, Jin-Fu Wang, Guang-Run Wang, De Zheng Wang, Ming-Han Han: Biodiesel production from waste oil feedstocks by solid acid catalysis. *Process safety and environment protection*, 2008, 86, s. 441-447.
- [12] Frąckowiak P.: Testing of esterification process of rape oil for tractor fuel in the prototype production plants of 400 dm³ output. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2002, vol. 47(2), s. 67-73.
- [13] Golimowski W.: Biopaliwa z oleju posmazalniczego wytwarzanego za pomocą technologii na zimno. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 2011, 1(71), s. 163-172.
- [14] Golimowski W., Graczyk A.: The influence of waste fats esterification process parameters in agricultural biofuel production facilities. *Environment Protection Engineering*, 2011, nr 4, s. 55-62.
- [15] Canakci M.: The potential of restaurant waste lipids as biodiesel feedstocks. *Bioresource Technology* 2007, 98; s. 183-190.
- [16] Myczko A., Golimowska R.: Porównanie właściwości estrów metylowych w zależności od pochodzenia i sposobu otrzymywania. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2011, vol. 56(2), s. 111-118.
- [17] Akoh C.C., Min D.B.: *Food Lipids*. Marcel Dekker AG, 2002, s. 1014.
- [18] Gawęcki J.: *Prawda o tłuszczach*. Instytut Danone – Fundacja Promocji Zdrowego Żywnienia. Warszawa, 1997, s. 76.
- [19] Szlachta Z.: Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami rzepakowymi. *WKŁ*, 2002, s. 184.