

Jerzy CISEK
Andrzej MRUK
Wojciech SZCZYPIŃSKI-SALA

PTNSS–2013–SC–087

Physical and tribological characteristics of Diesel engine fuel obtained by recycling of plastics

Abstract: The paper presents the results of analysing principal physical characteristics of the fuel supplying the self-ignition engines, derived from the processing of plastic waste. The essential factor decisive in applying a new generation of fuels for diesel engines is the compliance with the standards requirements concerning physical and chemical parameters. The research results were discussed in relation to the requirements of the standards in force in the countries of the European Union and compared with the characteristics of the fuels commercially available at present – mineral diesel fuel and rape oil methyl esters. These fuels lubricity characteristics influencing the life of the engine fuel system elements were examined as well. The lubricity characteristics were examined on a four-ball stand, assessing, for particular fuels, the test elements wear intensity in relation to the specific pressure and to the seizing load.

Keywords: diesel engine, alternative fuel, recycling

Właściwości fizyczne i tribologiczne paliwa do silników ZS uzyskanego drogą recyklingu tworzyw sztucznych

Streszczenie: W artykule opisano wyniki przeprowadzonych analiz podstawowych własności fizycznych paliwa do zasilania silników o zapłonie samoczynnym uzyskiwanego z przetworzenia odpadów tworzyw sztucznych. Podstawowym czynnikiem decydującym o zastosowaniu nowej generacji paliw do zasilania silników wysokoprężnych jest spełnienie przez nie wymagań stawianych przez normy, a dotyczących parametrów fizykochemicznych. Uzyskane wyniki badań omówiono w odniesieniu do wymagań zawartych w normach obowiązujących w krajach Unii Europejskiej i porównano z własnościami paliw dostępnych obecnie na rynku – mineralnego oleju napędowego i estrów metylowych oleju rzepakowego. Wykonano również oceny własności smarnych tych paliw, mających wpływ na trwałość elementów aparatury paliwowej silnika. Badania własności smarnych przeprowadzono na stanowisku czterokulowym, oceniając dla poszczególnych paliw intensywność zużycia elementów testowych w odniesieniu do nacisku właściwego oraz obciążenia zacierającego.

Słowa kluczowe: silniki wysokoprężne, paliwa alternatywne, recykling

1. Wprowadzenie

W pierwszej dekadzie XXI wieku zwraca się szczególną uwagę na ponowne zagospodarowanie zużytych produktów rynkowych. Stąd opracowywanie i doskonalenie technologii recyklingu. Jedną z technologii recyklingu tworzyw sztucznych z grupy polimerów jest przetwarzanie ich w paliwa płynne. Mogą do tego celu zostać wykorzystane różne technologie, w tym konwencjonalne, stosowane od lat w przemyśle rafineryjnym jak: kraking termiczny (piroliza), kraking katalityczny (FCC) czy hydrokraking [8].

Surowcami do procesu przeróbki mogą być odpady, które pod względem chemicznym są tworzywami z grupy polimerów zawierających tylko węgiel i wodór, w których występują długie łańcuchy węglowe. Przykładami takich tworzyw mogą tu być powszechnie stosowane opakowania środków czystości oraz kosmetyków, folie, worki jednorazowego i wielorazowego użytku, opakowania produktów spożywczych, jak również części urządzeń gospo-

darstwa domowego, elementy pojazdów samochodowych takie jak zderzaki, deski rozdzielcze itp.

Ocena przydatności każdego paliwa silnikowego wymaga szerokiego zakresu badań, zarówno laboratoryjnych, pozwalających ocenić własności fizykochemiczne paliwa, jak i badań silnikowych na hamowni i eksploatacyjnych. Wykorzystanie paliwa o odmiennych cechach wpływa na parametry energetyczne, jak i wielkość emisji składników toksycznych, które podlegają ograniczeniom ujętym w normach obowiązujących w Unii Europejskiej. Nie bez znaczenia jest też wpływ paliwa na stopień zużycia poszczególnych elementów silnika, w tym układu korbowo-tłokowego, łożysk, a w szczególności smarowanych paliwem elementów układu zasilania [10,11].

Trwałość par precyzyjnych aparatury paliwowej, sekcji tłoczących i wtryskiwaczy, uzależniona jest zarówno od prawidłowego wyboru materiałów konstrukcyjnych jak i własności smarnych zastosowanego paliwa [2,3,5,6,7,9].

W niniejszym artykule opisano wyniki oceny wybranych właściwości paliwa silnikowego, uzy-

skanego na drodze przetworzenia odpadów z tworzyw sztucznych PET, mogącego służyć do zasilania silników o zapłonie samoczynnym. Wykonano analizy podstawowych parametrów fizykochemicznych, a także przeprowadzono badania własności smarowościowych. Uzyskane wyniki porównano z otrzymanymi dla konwencjonalnego paliwa pochodzenia mineralnego oraz już coraz szerzej stosowanych estrów metylowych oleju rzepakowego RME.

2. Ocena porównawcza paliw

2.1. Skład frakcyjny

Ocenę wymagań dotyczących składu frakcyjnego przeprowadzono zgodnie z PN - EN 590:2009. Zbadano przebieg destylacji pod zmniejszonym ciśnieniem do 98 kPa, zgodnie z normą ASTM D1160. Wyznaczono początek destylacji, procentową ilość paliwa (% v/v) oddestylowanego odpowiednio do temperatur 250 °C i do 350 °C oraz określono przebieg krzywej destylacji, sprawdzając

temperatury oddestylowania kolejnych ilości paliwa. Przedstawione wyniki przeliczono na warunki normalne i zestawiono w tabeli 1 [1].

Z danych przedstawionych w tabeli 1 wynika jednoznacznie, że paliwo testowe PP ma skład frakcyjny bardzo zbliżony do oleju napędowego. Z porównania wyników badań widać, że dla estrów metylowych oleju rzepakowego, w temperaturze 250°C nie zaczyna się jeszcze odparowywanie, zatem RME z tego punktu widzenia jest paliwem znacznie gorszym niż testowane paliwo powstałe z przetwarzania odpadów tworzyw sztucznych.

W tabeli 2 zamieszczono wyniki pomiarów krzywej destylacji dla oleju napędowego, testowanego paliwa PP oraz estrów metylowych oleju rzepakowego - RME. Podobnie jak dla wyników badań składu frakcyjnego można stwierdzić, że paliwo powstałe z przetwarzania tworzyw sztucznych ma zdecydowanie bardziej zbliżony przebieg krzywej destylacji do oleju napędowego niż RME.

Tabela 1. Charakterystyka badanych paliw [1]

paliwo	początek destylacji [°C]	do 250 °C destyluje (v/v) [%]	do 350 °C destyluje (v/v) [%]	Oddestylowało (v/v) [%]
Olej napędowy	182	36,0	94,2	98,9
Paliwo testowe PP	187	28,9	84,1	97,2
Biodiesel RME B100	295	0	55,1	96,3

Tabela 2. Temperatury destylacji do krzywej destylacji [1]

Olej napędowy	Paliwo PP z odpadów tworzyw sztucznych	Biodiesel B100 RME
początek destylacji 182,0 °C	początek destylacji 187,0 °C	początek destylacji 295,6 °C
5% destyluje do 202,1 °C	5% destyluje do 206,6 °C	5% destyluje do 303,6 °C
10% destyluje do 216,8 °C	10% destyluje do 235,0 °C	10% destyluje do 317,3 °C
20% destyluje do 228,5 °C	20% destyluje do 247,3 °C	20% destyluje do 335,5 °C
30% destyluje do 241,2 °C	30% destyluje do 250,5 °C	30% destyluje do 340,6 °C
40% destyluje do 255,9 °C	40% destyluje do 266,4 °C	40% destyluje do 343,6 °C
50% destyluje do 270,9 °C	50% destyluje do 282,4 °C	50% destyluje do 346,3 °C
60% destyluje do 287,6 °C	60% destyluje do 302,1 °C	60% destyluje do 357,7 °C
70% destyluje do 305,7 °C	70% destyluje do 319,8 °C	70% destyluje do 360,4 °C
80% destyluje do 320,9 °C	80% destyluje do 339,6 °C	80% destyluje do 361,8 °C
90% destyluje do 340,7 °C	90% destyluje do 366,0 °C	90% destyluje do 363,0 °C
95% destyluje do 353,2 °C	95% destyluje do 383,1 °C	95% destyluje do 363,9 °C
100% destyluje do 363,0 °C	100% destyluje do 390,9 °C	100% destyluje do 382,1 °C

Zgodnie z normą dla oleju napędowego, do temperatury 250°C powinno odparować nie więcej niż 65% (v/v) paliwa, a do temperatury 350°C powinno odparować 95% (v/v) paliwa.

2.2. Wartość opałowa i ciepło spalania

Zarówno ciepło spalania jak i wartość opałowa paliwa zostały wyznaczone zgodnie z obowiązującą w tym zakresie w Polsce normą PN-86/C-04062. Wskazane normą oznaczenie ciepła spalania przeprowadza się z wykorzystaniem kalorymetru, w którym próbka paliwa spalana jest w bombie kalorymetrycznej.

W tabeli 3 zamieszczono wyniki pomiarów ciepła spalania i dolnej wartości opałowej dla oleju

napędowego, testowanego paliwa PP oraz estrów metylowych oleju rzepakowego.

Tabela 3. Ciepło spalania i wartość opałowa badanych paliw [1]

Paliwo	Ciepło spalania [MJ/kg]	Wartość opałowa [MJ/kg]
Olej napędowy	47,3	43,0
Paliwo testowe PP	46,7	42,4
Biodiesel RME - B100	40,2	36,6

Analiza wyników pokazuje, że wartość opałowa testowanego paliwa PP jest nieznacznie niższa niż dla oleju napędowego. Może to być, oprócz mniejszej gęstości badanego paliwa (co zostało opisane

w punkcie 2.4), dodatkowym powodem konieczności zwiększenia jednostkowej dawki nominalnej podawanej przez pompę wtryskową w celu uzyskania takiej samej mocy maksymalnej, jak dla silnika zasilanego olejem napędowym. Podkreślić jednak należy, iż uzyskana wartość, choć nieznacznie niższa niż dla oleju napędowego, jest zdecydowanie wyższa niż dla RME.

2.3. Liczba cetanowa

Liczbę cetanową oleju napędowego zmierzono zgodnie z normą dla oleju napędowego (PN-EN 590:2009), stosując normę szczegółową PN-EN ISO 5165 na silniku badawczym „cetanowcu” oraz metodą alternatywną przy użyciu analizatora Irox Diesel. Wyniki badań zrealizowanych na tych dwu stanowiskach pomiarowych, zarówno dla oleju napędowego jak i dla testowanego paliwa, są w tym przypadku zbliżone z dokładnością do +/-2% błęd pomiaru. Ponieważ obowiązujące normy dotyczące pomiaru wartości liczby cetanowej dopuszczają niepowtarzalność pomiaru wynoszącą (dla silnika cetanowego) +/-3,5% wartości mierzonej, to należy przyjąć, że w tym przypadku obie metody zapewniają bardzo dobrą wiarygodność pomiaru.

Uzyskane wartości liczby cetanowej LC dla badanych paliw wynoszą odpowiednio [1]:

- olej napędowy LC = 52,8,
- testowane paliwo LC = 55,3.

Zgodnie z PN - EN 590:2009 liczba cetanowa ma być nie mniejsza niż 51,0 jednostek. Większa wartość liczby cetanowej dla testowanego paliwa jest niezwykle ważną cechą, ponieważ decyduje ona o skłonności paliwa do samozapłonu w cylindrze silnika wysokoprężnego. Przy większych wartościach LC skróceniu ulega tzw. okres opóźnienia samozapłonu paliw, co skutkuje m.in. mniejszymi wartościami stężenia tlenków azotu NO_x w spalinach. Jest to niezwykle istotne, ponieważ emisja NO_x jest limitowana ze względu na fakt, iż jest to jeden z najbardziej toksycznych spośród gazowych składników spalin. Oczywiście istnieją dodatki do paliwa, które pozwalają na podwyższenie wartości liczby cetanowej, ale są one dość kosztowne i stwarzają dodatkowe utrudnienie logistyczne i problem z magazynowaniem ze względu na niską temperaturę samozapłonu. W przypadku testowanego paliwa nie ma potrzeby stosowania tego typu dodatków.

2.4. Gęstość

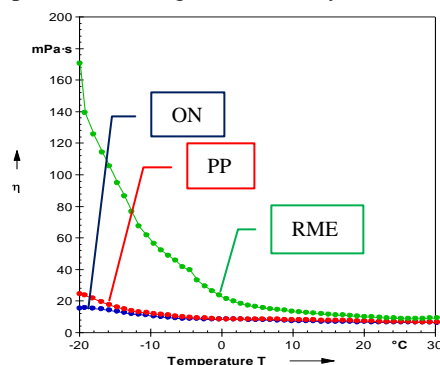
Gęstość paliwa określona została zgodnie z obowiązującą normą PN-EN ISO 3675 metodą areometryczną oraz dodatkowo, zgodnie z normą PN-EN ISO 3838, metodą grawimetryczną (pikto-metryczną) w temperaturze 15 °C. Zmierzona w laboratorium gęstość oleju napędowego wynosiła $\rho_{ON} = 0,830 \text{ g/cm}^3$, natomiast gęstość testowanego paliwa $\rho_{PP} = 0,795 \text{ g/cm}^3$ [1]. Konsekwencją mniejszej gęstości paliwa powstałego z przetwarzania

odpadów tworzyw sztucznych (w porównaniu z olejem napędowym) będzie m.in. mniejsza masowa dawka paliwa realizowana przez pompę wtryskową na charakterystyce zewnętrznej (przy częściowych obciążeniach silnika nie ma to znaczenia) oraz mniejsza masowa dawka paliwa realizowana w stałym czasie otwarcia wtryskiwacza w nowoczesnych układach wtryskowych (np. common rail). Skutkiem tego, przy założeniu takiej samej wartości opałowej dla badanych paliw i takiej samej wartości sprawności cieplnej, mniejsza będzie maksymalna moc silnika. W celu uzyskania takiego samego obciążenia silnika zasilanego olejem napędowym i testowanym paliwem należy zmienić regulację pompy wtryskowej, tzn. zwiększyć nominalną dawkę paliwa.

2.5. Lepkość dynamiczna

Jednym z podstawowych parametrów decydujących o zastosowaniu nowej generacji paliw do zasilania silników wysokoprężnych jest spełnienie przez nie parametrów fizykochemicznych. Niezwykle istotnym parametrem jest lepkość dynamiczna. Według polskiej normy PN-EN ISO 3104 lepkość dynamiczna jest miarą oporu przepływu lub deformacji cieczy. Lepkość decyduje o oporze przepływu paliwa w układzie zasilania. Wpływa na przebieg wtrysku, rozpylenie i zasięg strugi paliwa w komorze spalania silnika. Wpływa na własności smarne, co jest szczególnie ważne, jeżeli zasilane silniki są wyposażone w rotacyjne pompy wtryskowe, lub jeszcze ważniejsze, w nowoczesne układy pompowtryskiwaczy bądź system common rail, ponieważ w tych układach elementy są smarowane olejem napędowym.

Wyniki badań wpływu temperatury paliwa na wartości lepkości dynamicznej badanych paliw: oleju napędowego, testowanego paliwa oraz RME przedstawiono graficznie na rys.1 [1].



Rys.1. Wpływ temperatury na lepkość dynamiczną badanych paliw – olej napędowy (ON), testowane paliwo (PP), RME [7]

Jak wiadomo, na wartość lepkości paliwa ma wpływ nie tylko temperatura, ale również prędkość ścinania paliwa. W przypadku pompy wtryskowej stosowanej w układzie zasilania silnika, czy tym bardziej nowoczesnych układów typu common rail

lub pompowtryskiwacz, prędkość ścinania ma zdecydowanie większy wpływ na zmiany lepkości paliwa niż temperatura. Dla paliwa PP wytworzonego z tworzyw sztucznych nie zauważano wzrostu lepkości nawet wskutek dużych prędkości ścinania, a jego lepkość jest nawet nieco niższa niż dla oleju napędowego. Zatem również pod kątem charakterystyki lepkościowej paliwo PP nie ustępuje mineralnemu olejowi napędowemu.

2.6. Własności smarne

Ocenę własności smarnych i przeciwzatarciowych przeprowadzono na aparacie czterokulowym. Elementami badawczymi były standardowe kule (zgodnie z zaleceniami norm dotyczącymi aparatu czterokulowego) o średnicy 1/2" każda, wykonane ze stali łożyskowej ŁH15 o twardości 62 – 66 HRC i chropowatości powierzchni $Ra = 0,032 \mu\text{m}$. Wszystkie kule przed testami były dokładnie odłuszczone. Początkowa temperatura próbek paliwa wynosiła 20°C. Podczas przeprowadzonych prób wykonano oznaczenie intensywności zużycia elementów testowych, wyznaczono graniczne obciążenie zużycia oraz określono obciążenie zacierające.

Podczas próby sześćdziesięciminutowej liniowa prędkość tarcia pomiędzy elementami testowymi wynosiła 0,55 m/s, co odpowiadało prędkości obrotowej silnika napędowego stanowiska 1500 obr/min. Z uwagi na to, że punkty styku kul leżą poza osią wrzeciona napędu uchwytu górnej kulki, obciążenie na powierzchni styku elementów testowych (którymi są współpracujące kulki) można obliczyć według rozkładu sił w układzie regularnego czworoboku zgodnie z zależnością:

$$P_{\text{rzecz}} = 0,408P$$

gdzie: P – obciążenie nadane.

Uzyskane podczas tego testu wyniki przedstawiono na rys.2. Nacisk właściwy p_{wl} , tzn. nacisk, który przypada na zwiększoną w wyniku zużycia powierzchnię styku kul, określono jako:

$$p_{\text{wl}} = \frac{0,52P}{d^2}$$

gdzie: d – średnica śladu zużycia przy danym obciążeniu P; 0,52 – współczynnik przeliczeniowy.

Przedstawione na wykresie obciążenie skorygowane przeliczono zgodnie z poniższym wzorem:

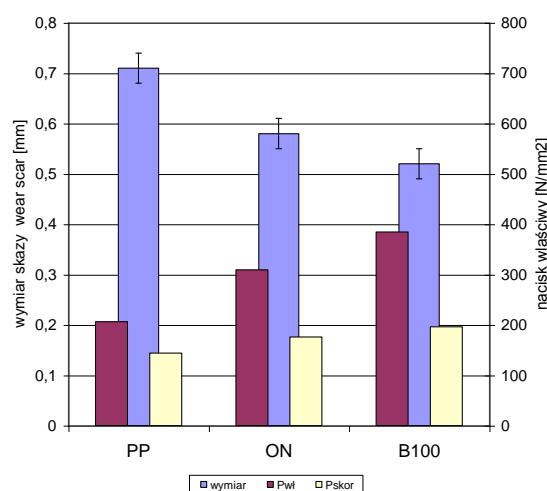
$$P_{\text{skor}} = \frac{PD_H}{d}$$

gdzie: D_H – średnica odkształcenia sprężystego kulki według Hertza przy danym obciążeniu statycznym, którą z kolei można obliczyć z wzoru:

$$D_H = 0,0873\sqrt[3]{P}$$

Przedstawione wyniki wskazują, iż testowane paliwo PP uzyskane z przetworzenia odpadów tworzyw sztucznych charakteryzuje się własnościami przeciwzużyciowymi niewiele ustępującymi olejowi napędowemu pochodzenia mineralnego, jednak są one już znacząco gorsze w porównaniu z

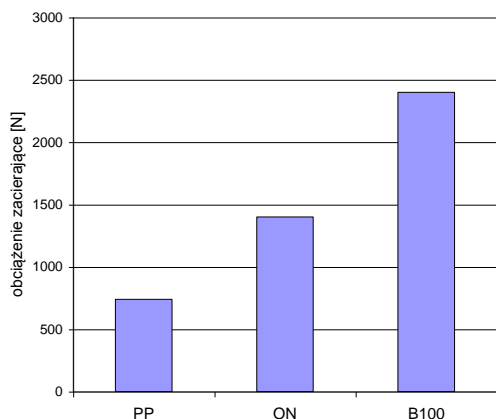
estrami metylowymi kwasów tłuszczowych (paliwo B100). Przeliczone obciążenia właściwe na powierzchni zużycia na styku kul testowych są niemal dwukrotnie mniejsze dla paliwa PP niż w przypadku paliwa B100. Tak jak stwierdzono powyżej, ocena paliwa PP odpowiadałaby niskosiarkowemu olejowi napędowemu. Z tego punktu widzenia wskazane wydaje się zastosowanie dodatków smarnościowych lub wykorzystanie domieszek biopaliw, które mogą znacząco wpływać na polepszenie własności smarnych już przy niewielkiej ich zawartości w mieszaninie. Ma to z kolei korzystny wpływ na trwałość elementów aparatury wtryskowej silnika.



Rys.2. Średni wymiar śladu zużycia w odniesieniu do obciążenia skorygowanego i nacisku właściwego

Również własności przeciwzatarciowe są najslabsze spośród ocenianych i porównywanych paliw dla paliwa PP. Wyniki oznaczeń przedstawiono na rys.3. Obciążenie zacierające dla paliwa PP jest niemal o połowę mniejsze niż dla oleju napędowego. Ta wartość pod kątem długotrwałej pracy układu zasilania silnika i jego elementów w części wysokociśnieniowej ma nieco mniejsze znaczenie niż wyznaczone naciski właściwe i wielkości zużycia elementów testowych. Elementy pompy wysokiego ciśnienia i wtryskiwaczy nie powinny bowiem być wystawione na aż tak duże obciążenia. Tym niemniej w teście tym bardzo wyraźnie uwidacznia się różnica pomiędzy własnościami estrów metylowych (paliwo B100) a paliwem PP. W tym wypadku ta różnica jest czterokrotna na korzyść paliwa B100.

Zaznaczyć w tym miejscu należy, iż najistotniejsze znaczenie ma w powyższym porównaniu odniesienie własności smarnych paliwa PP do własności niskosiarkowego oleju napędowego, bowiem w jego przypadku praktycznie stosowana jest modyfikacja własności dodatkami podnoszącymi własności smarne.



Rys.3. Wartości obciążenia zacierającego dla poszczególnych paliw w [N]

3. Podsumowanie

Przetwarzanie surowców wtórnych jest kierunkiem działań pozwalających na zagospodarowanie gromadzących się odpadów, zarówno poprodukcyjnych jak i po zużytych produktach rynkowych. Jest to szczególnie istotne ze względu na normy Unii Europejskiej. Przewiduje się, że po roku 2016, w przypadku pojazdów samochodowych, recyklingowi musi być poddawane 95% udziału masowego wycofanego z eksploatacji pojazdu. W przypadku tworzyw sztucznych z grupy polimerów ich recykling może polegać na przetworzeniu w paliwa

silnikowe, mogące stanowić zamiennik oleju napędowego pochodzenia mineralnego.

Badania wybranych własności paliwa pochodzącego z przetworzenia odpadów z tworzyw sztucznych pozwalają stwierdzić, iż jest to w pełni wartościowe paliwo silnikowe. W szczególności można zauważyć, że:

- paliwo takie ma zdecydowanie bardziej zbliżony przebieg krzywej destylacji do oleju napędowego niż estry metylowe oleju rzepakowego RME;
- jego wartość opałowa jest jedynie nieznacznie niższa niż dla oleju napędowego;
- wartość liczby cetanowej LC jest wystarczająca;
- gęstość jest mniejsza w porównaniu do oleju napędowego, czego konsekwencją jest m.in. mniejsza masowa dawka paliwa;
- pod względem charakterystyki lepkościowej paliwo nie ustępuje mineralnemu olejowi napędowemu;
- z uwagi na słabsze własności smarne do paliwa powinny być stosowane dodatki polepszające te własności.

Wyniki przeprowadzonych badań upoważniają do stwierdzenia, że paliwo pochodzące z przetworzenia odpadów z tworzyw sztucznych potencjalnie może stanowić pełnowartościowy zamiennik do silników wysokoprężnych.

Literatura

- [1] Cisek J. Badania paliwa nowego typu do silnika ZS. Sprawozdanie z badań dla: Technologie Ekologiczne Bełchatów. Vol. 557/IPSiSS/2009. Politechnika Krakowska, Kraków 2010.
- [2] Cisek J. The Effect of Plastic Waste Fuel on the HDV Diesel Engine Parameters. 7th Russian Scientific and Technical Conference POLITRANSPORT SYSTEMS. Krasnoyarsk 2010.
- [3] Cisek J., Mruk A., Szczypiński-Sala W. Wpływ biopaliw (fame) na właściwości eksploatacyjne rozpylaczy paliwa silnika z zapłonem samoczynnym. Czasopismo Techniczne Mechanika 3-M/2012.
- [4] Goodrum J.W., Geller D.P. Influence of fatty acid metyl esters from hydroxylated vegetable oils on diesel fuel lubricity, Bioresource Technology 96, 2005.
- [5] Jenkins S.R., i in. Diesel fuel lubricity development of a constant load scuffing test using the ball on cylinder lubricity evaluator. SAE Technical Paper 932691.
- [6] Qu J., Truhnan J. T., Blau P. J. Investigation of the scuffing characteristics of candidate material for heavy duty diesel fuel injectors, Tribology International 38, 2005.
- [7] Qu J., Truhnan J. T., Blau P. J. Scuffing transition diagrams for heavy duty diesel fuel injector material In ultra low – sulphur fuel – lubricated environment, Wear 259, 2005.
- [8] Recykling materiałów polimerowych, red. Błędzki A.K, WNT, Warszawa 1997.
- [9] Szczypiński-Sala W. Niektóre własności mieszanin olejów roślinnych i paliw do silników o zapłonie samoczynnym. Czasopismo Techniczne Mechanika 3-M/2012.
- [10] Wain K.S., Perez J.M., Chapman E., Boehman A.L. Alternative and low sulfur fuel options: boundary lubrication performance and potential problems, Tribology International 38, 2005.
- [11] Wielligh A.J., Burger N., Wilcocks T.L. Diesel engine failures due to combustion disturbances, caused by fuel with insufficient lubricity. Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 55 N 2, 2003.

Mr Jerzy Cisek, D.Sc. – Faculty of Mechanical Engineering at Cracow University of Technology.

Dr inż. Jerzy Cisek – Wydział Mechaniczny Politechniki Krakowskiej.



Mr Andrzej Mruk, – Professor in the Faculty of Mechanical Engineering at Cracow University of Technology.

Dr hab. inż. Andrzej Mruk – profesor na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej.



Mr Wojciech Szczypiński-Sala, D.Sc. – Faculty of Mechanical Engineering at Cracow University of Technology.

Dr inż. Wojciech Szczypiński-Sala – Wydział Mechaniczny Politechniki Krakowskiej.

