

Wojciech SZCZYPIŃSKI-SALA, Piotr STRZĘPEK

Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, Politechnika
Krakowska

OCENA WPŁYWU PALIW DO SILNIKÓW O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM NA MOŻLIWOŚĆ ZACIERANIA ELEMENTÓW PAR PRECYZYJNYCH

Słowa kluczowe

Paliwa, biopaliwa, smarność, aparat czterokulowy.

Streszczenie

Współczesne układy wtryskowe silników o zapłonie samoczynnym wymagają stosowania paliw zapewniających dostateczną ochronę przed zacieraniem elementów par precyzyjnych. Jednocześnie na coraz szerszą skalę wprowadzane są paliwa ze źródeł odnawialnych. Do olejów napędowych stosowane są domieszki biokomponentów. Największe różnice własności pomiędzy biopaliwami a paliwami mineralnymi dotyczą ich gęstości, lepkości kinematycznej, składu frakcyjnego, liczby cetanowej i temperatury blokowania zimnego filtra paliwa. W artykule opisano wyniki prób oceny własności smarnych różnych mieszanin paliw. Testy przeprowadzono na aparacie czterokulowym, a podczas oceny porównano własności estrów metylowych kwasów tłuszczowych olejów roślinnych oraz ich mieszanin z olejem napędowym w różnych proporcjach.

Wprowadzenie

Współcześnie pojazdy wyposażone w silniki o zapłonie samoczynnym cieszą się dużym powodzeniem i są chętnie nabywane również przez użytkowników samochodów osobowych. Wynika to po części z cech eksploatacyjnych obecnie produkowanych silników ZS, ich dynamiki i wysokiego momentu obro-

towego. Te korzystne cechy silniki te zawdzięczają nowoczesnym układom wtryskowym. Konsekwencją jest jednak znacznie większa niż wcześniej wrażliwość na własności paliw stosowanych do ich zasilania. Od chwili wynalezienia silniki spalinowe podlegały udoskonaleniom konstrukcyjnym i technologicznym. Podobnie równolegle rozwijała się technologia wytwarzania paliw silnikowych. Zapotrzebowanie światowej gospodarki na produkty ropopochodne stale wzrastało. Obecnie na coraz szerszą skalę stosowane jest dodawanie do paliw produkowanych z ropy naftowej biokomponentów i stopniowe wypieranie z rynku paliw, produkowanych ze źródeł nieodnawialnych.

Duże zainteresowanie biokomponentami świata nauki rokuje ich coraz szybszy rozwój, a potwierdzałyby ten kierunek wytyczne Unii Europejskiej określające limity wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych. Zgodnie z dyrektywą Unii Europejskiej do roku 2010 biopaliwa powinny stanowić 6% wykorzystywanych paliw, co w warunkach polskich oznacza rocznie około 360 tys. ton. Dużą zaletą biopaliw jest również łatwość produkcji, która nie wymaga zaawansowanych technologii. Stymulująco na rozwój w tej dziedzinie wpływać mogą zmiany w przepisach prawnych. Przykładowo Ustawa o biopaliwach dopuszcza w gospodarstwach rolnych produkcję na własny użytek do 100 litrów oleju rzepakowego na hektar gospodarstwa.

1. Biododatki

Paliwo do silników wysokoprężnych z dodatkami biokomponentów nazywane jest popularnie biodieslem. Prace nad możliwościami zastosowania jako paliw do silników spalinowych tłuszczów roślinnych i zwierzęcych prowadzone były już w latach 30. ubiegłego wieku. Współcześnie jako domieszki do olejów napędowych stosowane są oleje roślinne (SVO – *Straight Vegetable Oil*), częściej jednak są to estry metylowe kwasów tłuszczowych olejów roślinnych lub tłuszczów zwierzęcych (FAME – *Fatty Acid Methyl Esters*). Znane są również technologie pozwalające na przetwarzanie tłuszczy roślinnych pozostałych po smażeniu bądź gotowaniu produktów spożywczych (MWVF – *Modified Waste Vegetable Fat*). Praktycznie w każdym Europejskim kraju powstały odrębne wytyczne mówiące o produkcji paliw ekologicznych. Na przykład we Francji sprzedawany jest olej napędowy z dodatkiem 5% estrów (RME – *Rape Methyl Ester*). Również w Wielkiej Brytanii na stacjach paliwowych można otrzymać paliwo z 5% dodatkiem RME. Natomiast w Niemczech można zakupić paliwo będące w 100% RME, równolegle sprzedawany jest olej napędowy z dodatkiem 5% RME. Coraz częściej paliwo stanowiące w 100% FAME używane jest w USA.

2. Kierunki badań na świecie

Stosowanie paliw wytwarzanych z surowców roślinnych w zależności od tego jak znacznie odbiegają one swymi własnościami od paliw mineralnych,

może wymuszać pewne zmiany adaptacyjne i regulacyjne silników. Największe różnice własności pomiędzy biopaliwami a paliwami mineralnymi dotyczą ich gęstości, lepkości kinematycznej, składu frakcyjnego, liczby cetanowej i temperatury blokowania zimnego filtra paliwa.

W nowoczesnych układach wtryskowych wytwarzane są bardzo wysokie ciśnienia, a małe tolerancje wymiarowe precyzyjnie wykonanych elementów zapewniają minimalne luzy w parach precyzyjnych. Takie konstrukcje wymagają dobrego smarowania. Można przyjąć, iż obecnie ponad połowa uszkodzeń do jakich dochodzi w nowoczesnych silnikach o zapłonie samoczynnym dotyczy układu wtryskowego lub jest z nim związana [1].

Obok zanieczyszczeń stałych za główny czynnik wywołujący uszkodzenia rozpylaczy paliwa można uznać słabe własności smarne paliw. Na końcówkach iglic rozpylaczy obserwować można ślady zużycia ściernego. Utrudniony ruch iglicy w części prowadzącej może powodować niedomykanie rozpylacza, a w takim przypadku gazy spalinowe dostają się do wnętrza rozpylacza dodatkowo jeszcze pogarszając warunki współpracy par precyzyjnych. Uszkodzenia tego typu ilustruje rys. 1.

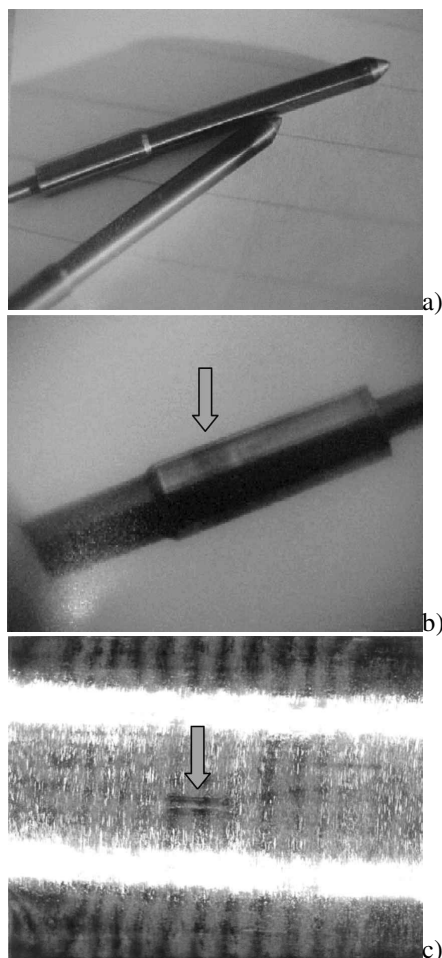
Prowadzone na szeroką skalę badania nad biokomponentami dowodzą ich dobrych właściwości. Kilkuprocentowy dodatek biokomponentu może istotnie wpłynąć na własności smarne otrzymanej mieszaniny z olejem napędowym. Jak stąd wynika, bardzo istotne znaczenie ma ocena własności smarnych współcześnie wykorzystywanych paliw. Stosuje się w tym celu kilka różnych metod badawczych, które pokrótce przedstawione zostaną poniżej.

Bardzo popularny w badaniach jest tak zwany test HFRR – *High Frequency Reciprocating Rig*. W próbie tej doprowadza się do styku kulki oraz dysku, a następnie wprowadza się cały układ w drgania. Stalowa kulka o średnicy 6 mm wykonuje drgania o częstotliwości 50 Hz na stalowej płytce zanurzonej w badanym paliwie. Jako wynik testu podawana jest średnica śladu zużycia powstałego na próbce. Światowa Karta Paliw dopuszcza w teście HFRR dla olejów napędowych maksymalną średnicę zużycia 400 μm . Metodą tą prowadzono badania w Williams Laboratory Services [2]. Badano smarność oleju napędowego z różnymi dodatkami, takimi jak oleju rycynowego i sojowego. Oleje te dodawane były stopniowo do oleju napędowego.

Podobnie tą metodą na Politechnice Ateńskiej przeprowadzono próby smarności niskosiarkowych paliw do silników ZS. Badane były oleje napędowe o zawartości siarki 0,023 i 0,03%. Podczas testu HFRR każdy z nich pozostawiał na kulce ślad większy niż 0,46 mm. Do paliwa o mniejszej zawartości siarki dodawano również w próbach: eter butylowo-etylowy, eter dibutylowy, eter heptylo-metylowy, eter dipentylowy, eter oktylo-etylowy, eter dioktylowy, eter oktadecylo-etylowy.

Stowarzyszenie Producentów Silników EMA proponuje wykorzystywanie do testów paliw silnikowych metody, w której współpraca odbywa się pomiędzy obciążoną kulką a obracającym się pierścieniem częściowo zanurzonym w ba-

danym paliwie. Największe obciążenie kulki podczas testu, przy którym nie zostaje przekroczony dopuszczalny wymiar śladu zużycia stanowi miarę własności smarnych badanego paliwa. Metoda ta znana jest pod nazwą SLBOCLE (*Scuffing Load Ball on Cylinder Lubricity Evaluator*) [3].



Rys. 1. Przykłady uszkodzeń iglic: a) ślady przegrzania na końcówkach, b) ślady zatarcia w części prowadzącej, c) rysy na powierzchni [1]

K.S. Wain i inni [4] prowadzili badania własności smarnych na aparacie czterokulowym. Autorzy zbadali właściwości kilku rodzajów paliw, takich jak:

- oleju napędowego (zawartość siarki 350 ppm),
- biodiesla w postaci estrów (nie zawiera siarki),
- eteru dimetylowego (zawartość siarki 350 ppm),
- oleju napędowego o niskiej zawartości siarki (zawartość siarki 13 ppm).

Wyniki przeprowadzonych doświadczeń wykazały, że paliwa z biokomponentami charakteryzują się niższym stopniem zużycia elementów badawczych niż w przypadku paliw niskosiarkowych. Dodatkowo autorzy zwrócili uwagę na możliwe do uzyskania zwiększenie żywotności systemów oczyszczania spalin dzięki mniejszym emisjom szkodliwych związków przy spalaniu biopaliw.

W badaniach przeprowadzonych w Oak Ridge National Laboratory przez J.Qu, J.Truhnan i innych [5, 6] zastosowano metodę polegającą na pocieraniu o siebie walcowych próbek smarowanych odpowiednim paliwem. Pozwala ona przetestować nie tylko różne paliwa, ale i to jak ze sobą współpracują różne materiały par precyzyjnych. Podczas prób można zaobserwować zmianę współczynnika tarcia, która spowodowana jest przerywaniem filmu smarującego i powstawaniem rys na próbkach. Autorzy opisali wyniki testów prowadzonych na:

- oleju napędowym (zawartość siarki 0,3%),
 - niskosiarkowym paliwie (zawartość siarki 0,002%),
- oraz kilku rodzajów materiałów elementów wtryskiwaczy:
- stali,
 - cyrkonu,
 - spieków ceramiczno-metalowych,
 - powłok tytanowo-niklowych.

Wyniki tych badań, między innymi, wskazały cyrkon jako najlepszy materiał na elementy wtryskiwaczy oraz potwierdziły słabe własności smarne paliw niskosiarkowych. Dodatkowo okazało się, iż w przypadku takich właśnie paliw zmniejszenie chropowatości powierzchni elementów jeszcze bardziej pogarsza warunki współpracy.

3. Ocena występowania zacierania

3.1. Zakres przeprowadzonych prób

W celu określenia własności paliw i ich zdolności do przeciwdziałania możliwości występowania zacierania w parach precyzyjnych aparatury paliwowej w laboratorium Instytutu Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych wykonano próby oceny własności smarnych różnych kompozycji paliw do silników o zapłonie samoczynnym z domieszkami biokomponentów. Badania wykonano na przygotowanych następujących próbkach paliw: olej napędowy, estry metylowe oleju rzepakowego, mieszanina oleju napędowego z dodatkiem 20% estrów w proporcji objętościowej (w skrócie w dalszej części tekstu proporcje zapisywane będą 80/20), mieszanina oleju napędowego z dodatkiem estrów w proporcji 50/50, mieszanina oleju napędowego z dodatkiem 20% oleju rzepakowego – 80/20, mieszanina oleju napędowego z dodatkiem oleju rzepakowego w proporcji 50/50 oraz mieszanina estrów metylowych z 20% dodatkiem nieprzetworzonego oleju rzepakowego – 80/20 i mieszanina estrów z dodatkiem oleju rzepakowego w proporcji 50/50.

Podczas testów (prowadzonych na aparacie czterokulowym) elementami badawczymi były standardowe kule o średnicy ½’’ każda, wykonane ze stali łożyskowej ŁH15 o twardości 62–66 HRC. Wykonano dla wymienionych kompozycji paliw oznaczenia obciążenia zacierającego, podczas których kula zamocowana w górnym uchwycie obracała się z prędkością 500 obr/min, a przyłożone obciążenie podczas współpracy kul rośnie liniowo od wartości zerowej z prędkością 408,8 N/s. Przeprowadzono również próby, podczas których kula zamocowana w górnym uchwycie obraca się z prędkością 1500 obr/min, co odpowiadało prędkości tarcia 0,55 m/s, a każda z tych prób trwała 60 minut. Początkowa temperatura próbek paliwa wynosiła 20°C. Przyłożone obciążenie nadane podczas tej próby wynosiło 400 N. Należy doprecyzować tu jeszcze, iż podczas tego typu prób można wyróżnić kilka rodzajów obciążeń, jakim poddane są elementy testowe [7]:

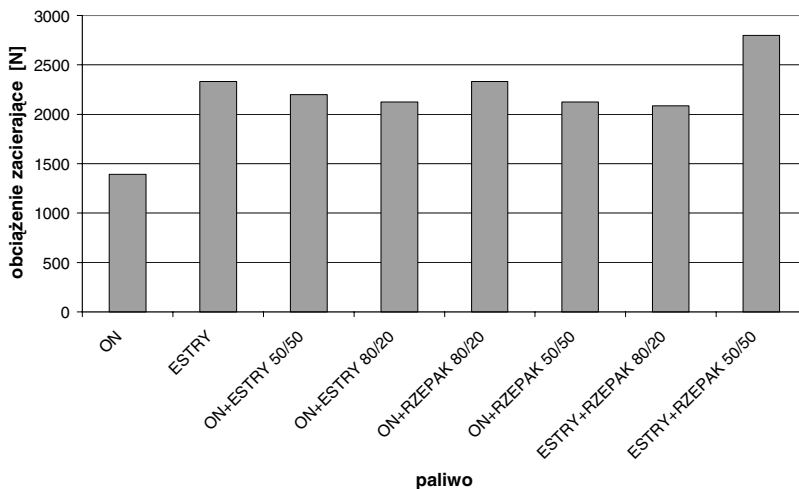
- obciążenie nadane P – obciążenie przyłożone do współpracujących elementów,
- obciążenie rzeczywiste kulek P_{rzecz} , tzn. obciążenie, które występuje między dolnymi kulkami a kulką górną, oblicza się je według rozkładu sił w układzie regularnego czworościanu $P_{rzecz} = 0,408P$,
- nacisk właściwy P_{wt} , tzn. nacisk, który przypada na zwiększoną w wyniku zużycia powierzchnię styku kul $P_{wt} = \frac{0,52P}{d^2}$ gdzie: d – średnica śladu zużycia przy danym obciążeniu P ; 0,52 – współczynnik przeliczeniowy,
- obciążenie skorygowane $P_{skor} = \frac{PD_H}{d}$ gdzie: P – obciążenie nadane N ; D_H – średnica odkształcenia sprężystego kulki według Hertza przy danym obciążeniu statycznym, można ją obliczyć ze wzoru: $D_H = 0,0873\sqrt[3]{P}$.

Podane warunki badań odpowiadają wymaganiom określonym w normie [8] dla badań na tego typu stanowisku. Należy jeszcze podkreślić w tym miejscu, iż procedury badań na aparacie czterokulowym ujęte w powyżej wspomnianej normie pozwalają uzyskiwać wiarygodne wyniki, dając jednocześnie możliwość porównania ich z wynikami wcześniej prowadzonych badań nad innymi kompozycjami paliw w różnych ośrodkach na świecie.

3.2. Własności poszczególnych paliw

Wyniki pomiarów szczególnie jaskrawo wykazują zróżnicowanie własności pomiędzy czystym olejem napędowym a jego mieszaninami z dodatkami biokomponentów. Wyznaczone obciążenie zacierające (rys. 2) było najmniejsze dla czystego oleju napędowego, co wskazuje, że paliwo to posiada najmniejszą odporność na zacieranie w testowanym węźle tarcia. Najwyższe (prawie dwukrotne) obciążenie oznaczono dla mieszaniny estrów metylowych z nieprzetworzonym olejem rzepakowym. Pozostałe paliwa charakteryzują się znacznie większymi obciążeniami zacierającymi w stosunku do czystego oleju napędowego.

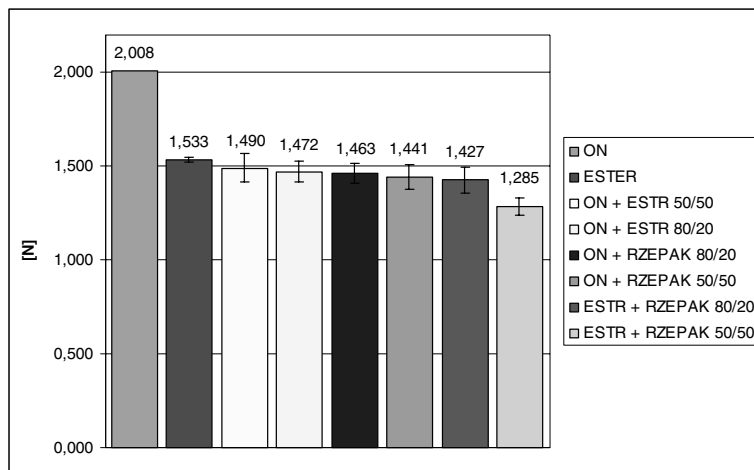
Na podstawie prób sześćdziesięciminutowych stwierdzić można, iż zarówno średnia siła tarcia, jak i wielkości śladów, które pozostały na kulkach, są większe dla oleju napędowego niż w przypadku pozostałych paliw, co wskazuje na lepsze właściwości smarne zastosowanych jako dodatki biokomponentów. Dokładniejszą analizę można przeprowadzić na podstawie wykresów, które przedstawiają średnie wartości poszczególnych parametrów uzyskanych podczas badań.



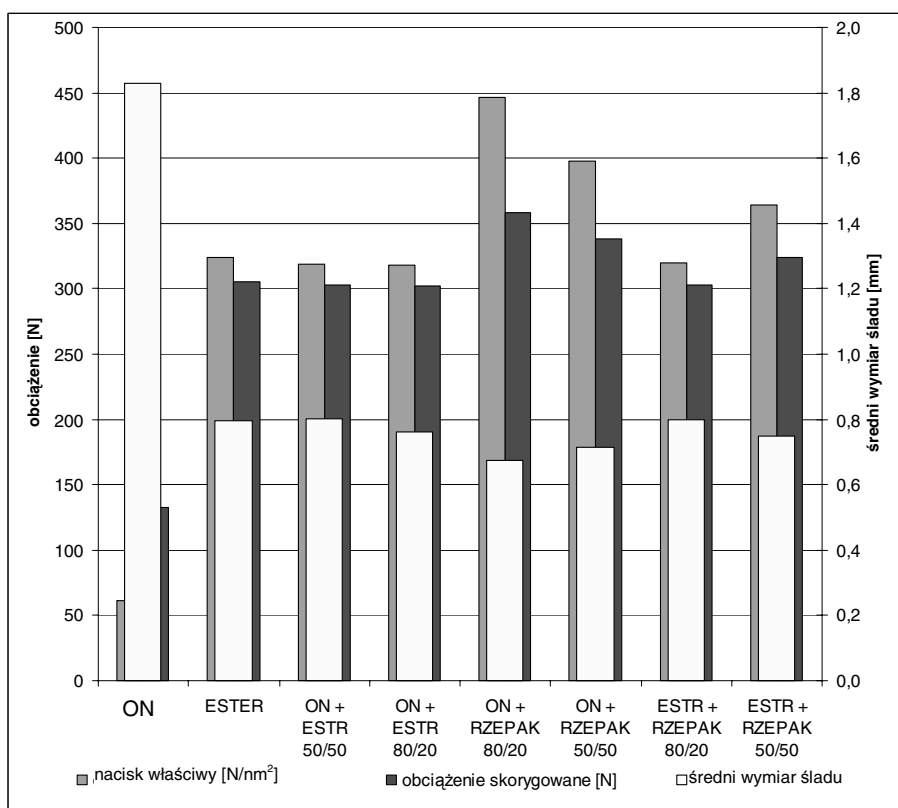
Rys. 2. Wartości obciążenia zacierającego dla poszczególnych paliw w [N]

Na podstawie przedstawionych na wykresie (rys. 3) wyników można stwierdzić, iż najwyższą siłę tarcia zarejestrowano dla czystego oleju napędowego. Najniższa odpowiada mieszaninie estru z olejem rzepakowym w stosunku 50/50. W pozostałych przypadkach siły są porównywalne. Wahają się od 1,42 N dla mieszaniny estru z rzepakiem do 1,53 N dla czystego estru. Jednak wartości te można uznać za porównywalne ze względu na rozrzut uzyskiwanych wyników.

Przedstawione wykresy (rys. 4) potwierdzają, iż olej napędowy charakteryzuje się najgorszymi spośród badanych mieszanin paliw właściwościami smarnymi. Zarówno na kulce górnej, jak i dolnej wymiary śladów zużycia były największe. Najmniejszy ślad powstawał przy mieszaninie oleju napędowego i rzepaku w stosunku 80/20. Za charakteryzujące się dobrymi właściwościami smarnymi paliwo można też uznać mieszaninę estru metylowego oraz oleju rzepakowego zmieszanych w proporcji 50/50. Przy nieznacznie większych – bo jedynie o około 7% – wymiarach śladu zużycia na kulkach cechuje się z kolei ono najmniejszą (o około 20% w porównaniu z pozostałymi badanymi mieszaninami) wartością siły tarcia. Jak z powyższego wynika zarówno czyste estry, jak i wszystkie badane mieszaniny wykazują znacznie lepsze właściwości smarne niż sam olej napędowy.



Rys. 3. Średnia wartość siły tarcia pomiędzy kulkami w [N]



Rys. 4. Średni wymiar śladu zużycia w odniesieniu do obciążenia skorygowanego i nacisku właściwego

Podsumowanie

Stosowane wspólnie paliwa muszą spełniać szereg wymagań jakościowych, w przeciwnym razie mogłyby spowodować poważne uszkodzenia aparatury wtryskowej silników, w których zostaną użyte jako paliwo. Obecnie coraz częściej zastępuje się ropę naftową komponentami tlenowymi znanymi również jako biokomponenty. Tego typu paliwa zapewniają odpowiednie smarowanie ruchomym częściom wtryskiwaczy oraz pomp wtryskowych. Z przeprowadzonych badań można wywnioskować, iż nawet mały dodatek estrów metylowych kwasów tłuszczowych olejów roślinnych lub nieprzetworzonych olejów roślinnych wpływa korzystnie na własności smarne paliw. W szczególności w oparciu o wyniki z przeprowadzonych pomiarów można sformułować stwierdzenia:

- czysty olej napędowy charakteryzuje się znacznie mniejszą smarnością od pozostałych badanych paliw,
- nawet mały dodatek biokomponentu do oleju napędowego znacznie zwiększa jego smarność, co ma wpływ na trwałość elementów aparatury wtryskowej silnika,
- spośród przebadanych mieszanin najlepszymi właściwościami smarnymi wyróżnia się mieszanina oleju napędowego i oleju rzepakowego w proporcji 80/20.

Wyniki pomiarów uzyskane podczas prób na aparacie czterokulowym pozwalają porównać własności ocenianych kompozycji paliw, przyjmując jako poziom odniesienia własności czystego oleju napędowego. Wybrane do badań stanowisko jest jednym z kilku typów stosowanych obecnie do oceny własności smarnych, daje możliwość porównania uzyskanych wyników z wynikami uzyskanymi w innych laboratoriach na świecie. Pozwala stosunkowo szybko ocenić własności smarne, a decydują one o warunkach współpracy elementów w rzeczywistym układzie zasilania silnika. Wnioskować zatem można na ich podstawie o przydatności ocenianych kompozycji paliw. Jest to istotne, zwłaszcza iż wskazana powyżej mieszanina, również z punktu widzenia charakterystyki użytkowej zasilanych nią silników, ma duże szanse praktycznego zastosowania.

Badania nad biokomponentami paliw płynnych prowadzone są w różnych dziedzinach nauki. Coraz doskonalsze metody badań w połączeniu z nowymi propozycjami zastosowania różnych związków jako paliw i ich domieszek rokuje uzyskanie alternatywnych paliw o bardzo dobrych własnościach.

Bibliografia

1. 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.
2. Goodrum J.W., Geller D.P., Influence of fatty acid metyl esters from hydroxylated vegetable oils on diesel fuel lubricity, *Bioresource Technology* 96, 2005.

3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Materiały informacyjne ITeE – PIB Radom.
8. Norma BN-77/0535-46.

Recenzent:

Andrzej KULCZYCKI

Investigation on the influence of diesel engine fuel on scuffing fuel feed components

Key-words

Fuel, biofuel, lubricity, four ball test.

Summary

Engine manufacturers and refineries are exploring new technologies to meet the stringent demands. Alternative fuels and lubrication options are needed to aid future engine development. Globally, biofuels are most commonly used to power vehicles. Biofuel industries are expanding in Europe, Asia and the Americas. Refined from a renewable resources biodiesel fuels are widely use for diesel engines too. Biodiesel is the most common biofuel in Europe. It is produced from oil or fats and is a liquid similar in composition to fossil/mineral diesel. Its chemical name is fatty acid methyl (or ethyl) ester (FAME). One way to introduce biofuels into the market is to blend biodiesel into diesel fuel. The standard mixture used in Europe is a blend of 5% methyl esters in 95% diesel fuel.

The use of biodiesel is one solution to improving the lubricity of low sulphur diesel fuels. The methyl esters are effective in reducing friction when used as an additive in diesel fuel. In the paper, bench tests comparing friction and wear characteristics of the fuels for diesel engines are described. The results were obtained in laboratory tests using the four-ball wear tester.