

**Robert GIELNIEWSKI\***, **Krzysztof GÓRSKI\***, **Wincenty LOTKO\***,  
**Remigiusz MICHALCZEWSKI\*\***

## **ANALIZA ZACIERANIA ELEMENTÓW POMPY WTRYSKOWEJ ROZDZIELACZOWEJ CAV DPA ZASILANEJ MIESZANINĄ ON I EETB**

**THE ANALYSIS OF SCUFFING FAILURE OF A CAV DPA  
INJECTION PUMP FUELLED WITH A MIXTURE  
OF DIESEL FUEL AND ETBE**

### **Słowa kluczowe:**

zatarcie, pompa wtryskowa, olej napędowy, aparat czterokulowy, eter etylo-tert-butylowy (EETB)

### **Key words:**

scuffing, injection pump, diesel fuel, four-ball apparatus, ethyl tert-butyl ether (ETBE)

### **Streszczenie**

W pracy dokonano analizy przyczyny zacierania elementów pompy wtryskowej zasilanej mieszaniną oleju napędowego i EETB. W wyniku przeprowadzonych analiz podejrzewano, że przyczyna zatarcia tkwi w obniżeniu jakości paliwa. Badania właściwości smarnych paliwa przeprowadzono w wykorzystaniem

---

\* Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, ul. Krasickiego 54, 26-600 Radom, e-mail: krzysztof.gorski@uthrad.pl

\*\* Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Tribologii, ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, e-mail: remigiusz.michalczewski@itee.radom.pl

aparatu czterokulowego. W wyniku badań stwierdzono, że dodatek eteru etylo-tert-butylowego, w ilości 10% lub większej, zdecydowanie obniża właściwości smarne oleju napędowego (nawet o kilkadziesiąt procent), co było przyczyną zacierania elementów pompy wysokiego ciśnienia i rozdzielacza paliwa.

## WPROWADZENIE

Wzrastające wymagania ekologiczne w zakresie ograniczenia emisji szkodliwych składników spalin do otoczenia skłaniają do poszukiwania nowych rodzajów paliw silnikowych. W przypadku silników diesla szczególną uwagę poświęcano paliwom pochodzenia roślinnego. Spośród nich najbardziej popularne są oleje roślinne, ich estry, a także etanol oraz wybrane etery. Takie paliwa mogą być samoistnym paliwem dla silników diesla lub mieszane z olejem napędowym w różnych proporcjach. W literaturze światowej coraz więcej uwagi poświęca się etanolowi, który postrzegany jest jako niedrogi, odnawialny i ekologiczny paliwo głównie dla silników o zapłonie iskrowym. Trwają również prace nad wykorzystaniem etanolu do zasilania silników diesla [L. 1–3]. Jednak jest to utrudnione ze względu na szczególne własności fizykochemiczne etanolu, tj. jego niską liczbę cetanową oraz wysoką temperaturę samozapłonu. Etanol może być dostarczony do komory spalania silnika diesla w postaci mieszany z olejem napędowym. Takie rozwiązanie jest korzystne, gdyż nie wymaga wykonania skomplikowanej adaptacji technicznej układu zasilania silnika w paliwo. Jednak mieszaniny etanolu z olejem napędowym mają tendencję do rozwarstwiania pod wpływem nawet niewielkich ilości wody oraz spadku temperatury [L. 4–5]. Dlatego zwrócono uwagę na EETB, który może być wytwarzany z etanolu i mieszany z ON w dowolnych proporcjach. Wykazano, że takie mieszaniny są stabilne w szerokim zakresie zmian temperatur i nie ulegają rozwarstwieniu pod wpływem wody. Ważną korzyścią wynikającą z zastosowania EETB w mieszaninie z ON do zasilania silników diesla jest wyraźne ograniczenie emisji limitowanych składników spalin, a szczególnie cząstek stałych (PM). Zaledwie 10% dodatek EETB do ON ogranicza tę emisję o ok. 36% [L. 6]. Prace nad wykorzystaniem EETB, a także innych eterów do zasilania silników diesla są realizowane na całym świecie, a uzyskane rezultaty publikowane w renomowanych czasopismach [L. 7–11].

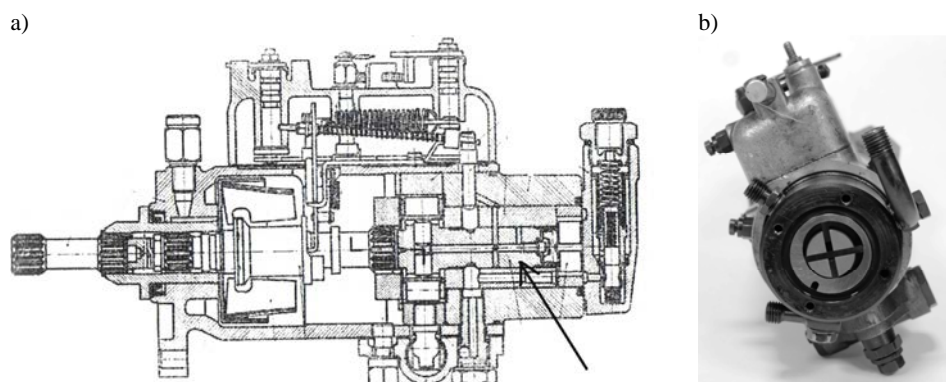
Także na Uniwersytecie Technologiczno-Humanistycznym w Radomiu prowadzone są prace nad zastosowaniem mieszanin oleju napędowego z EETB do zasilania silników o zapłonie samoczynnym [L. 12–14].

Zanim rozpoczęto prace badawcze nad zasilaniem silnika o zapłonie samoczynnym AD3.152 mieszaninami oleju napędowego (ON) z EETB, wykonano badania smarności na popularnym aparacie HFRR. Niestety temperatura w czasie badań paliw, wynosząca 60°C, nie mogła być zachowana, gdyż powodowałoby to intensywne parowanie eteru. Dlatego określenie smarności mieszanin EETB z ON przeprowadzono w temperaturze 25°C, wykorzystując w badaniach specjalną przystawkę pomiarową, której zadaniem było odizolowanie badanej

próbki od otoczenia. W przypadku większych udziałów EETB z ON niż 5% obserwowano pogorszenie własności smarnych. Współczynnik smarności dla czystego oleju napędowego przy 25°C wynosił 380  $\mu\text{m}$  [L. 15]. Dla badanych mieszanin paliw zawierał się w granicach 220–270  $\mu\text{m}$  [L. 16]. Ale ponieważ pompa wtryskowa w czasie pracy nagrzewa się do znacznie wyższej temperatury niż 25°C, postanowiono dokonać analizy zatarcia rozdzielacza wysokiego ciśnienia paliwa w oparciu o szerszy zakres badań zjawiska zacierania.

### Symptomy zacierania pompy wtryskowej CAV DPA

W trakcie badań nad zastosowaniem mieszanin oleju napędowego z eterem etylo-tert-butyłowym do zasilania silnika AD3.152 z pompą wtryskową rozdzielaczową CAV stwierdzono zacieranie elementów pompy wtryskowej w komorze wysokiego ciśnienia paliwa i rozdzielacza – **Rys. 1** [L. 17, 18].



**Rys. 1. Pompa wtryskowa CAV DPA: a) schemat ze wskazanym strzałką zatartym elementem, b) fotografia pompy**

Fig. 1. CAV DPA injection pump: a) a scheme with an indicated scuffed part, b) the pump photograph

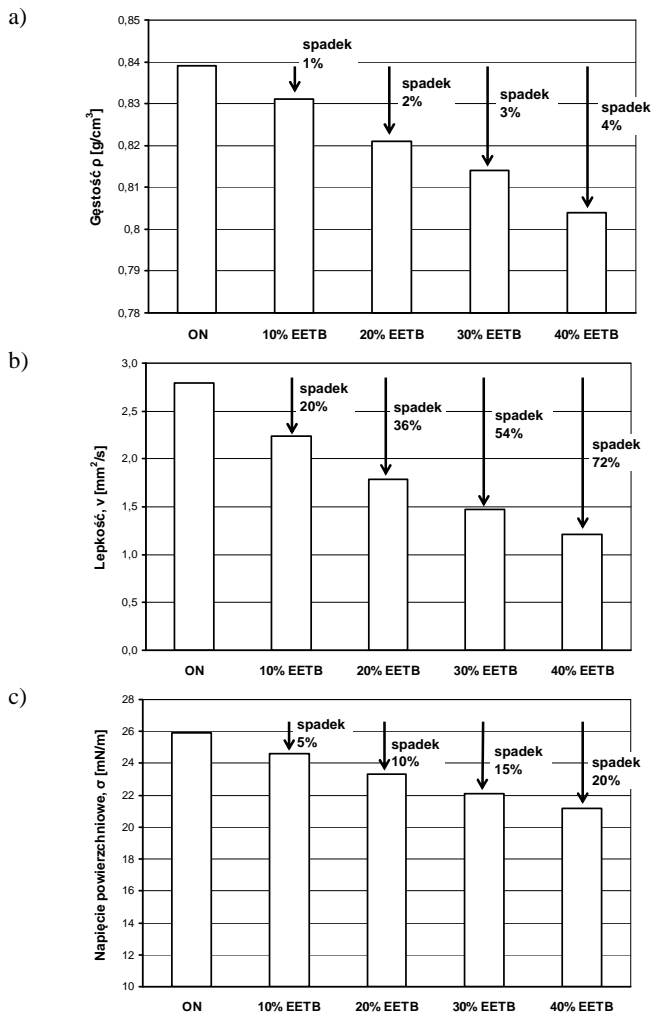
W trakcie badań silnik był zasilany mieszaninami ON i EETB o objętościowym udziale drugiego paliwa 10, 20, 30 i 40%. Należy tu podkreślić, że nie były to badania trwałościowe, a polegały one na wykonywaniu charakterystyk prędkościowych, obciążeniowych i prób swobodnego przyspieszania. Do czasu wystąpienia zatarcia pompy wtryskowej silnik pracował na tych mieszaninach łącznie ok. 800 godzin. Warto tu nadmienić, że paliwo EETB stosowane jest powszechnie do silników o zapłonie iskrowym celem podwyższenia liczby oktanowej benzyn. Należy w tym miejscu przypomnieć, że w silniku o zapłonie samoczynnym paliwo pełni również funkcję czynnika smarującego elementy tłoczenia pompy wtryskowej i wtryskiwaczy. Dlatego postanowiono dokonać analizy wstępnej przyczyn zatarcia rozdzielacza wysokiego ciśnienia pompy wtryskowej, który rozdziela paliwo o ciśnieniu rzędu 70 MPa.

### Własności fizykochemiczne badanych paliw

Na podstawie badań własnych i uzyskanych z „Laboratoriów Paliw” [L. 12–14] obliczono, że każdorazowe dodanie 10% objętościowo eteru EETB do oleju napędowego powodowało:

- obniżenie gęstości paliwa o ok. 1%,
- zmniejszenie lepkości kinematycznej paliwa o ok. 18%,
- spadek napięcia powierzchniowego  $\sigma$  o ok. 5%.

Powyższe zmiany wybranych parametrów fizykochemicznych badanych paliw pokazano na **Rys. 2**.



**Rys. 2.** Wpływ udziału EETB w mieszaninie z olejem napędowym na: a) gęstość w 20°C, b) lepkość w 40°C, c) napięcie powierzchniowe  $\sigma$  w 20°C

Fig. 2. The effect of ETBE in blend with diesel oil on: a) density at 20°C, b) viscosity at 40°C, c) surface tension at 20°C

Pod względem zapewnienia odporności na zacieranie pompy zmiany gęstości paliwa można w zasadzie pominąć. Na zatarcie pompy wtryskowej CAV DPA mogą wpływać znaczące zmiany lepkości i napięcia powierzchniowego stosowanych mieszanin paliw.

Celem badań było zbadanie wpływu dodatku eteru etylo-tert-butyłowego na odporność na zacieranie stalowego wężła tarcia.

## METODYKA BADAŃ

Badania tribologiczne wykonano z wykorzystaniem aparatu czterokulowego T-02U. Zastosowano dwie metody: z ciągłym narastaniem obciążenia i pod stałym obciążeniem.

Badania z ciągłym narastaniem obciążenia przeprowadzono za pomocą aparatu czterokulowego oznaczonego symbolem T-02. Badanie polegało na przeprowadzeniu, w określonych warunkach, biegu zespołu czterech kulek w obecności badanego paliwa pod wzrastającym w sposób ciągły obciążeniem (zaczynającym się od zera) i rejestracji zmian wartości oporów ruchu aż do uzyskania zatarcia kulek.

Badania zacierania przeprowadzono w następujących warunkach:

- prędkość obrotowa wrzeciona  $500 \pm 20$  obr/min,
- prędkość narastania obciążenia  $409$  N/s,
- obciążenie początkowe  $0$  N,
- obciążenie maksymalne  $7200 \pm 100$  N,
- temperatura otoczenia  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ .

Elementami testowymi były kulki łożyskowe o średnicy nominalnej  $1/2''$ , wykonane ze stali łożyskowej ŁH15 w klasie dokładności 16 według PN-83/M-86452. Chropowatość powierzchni charakteryzowana parametrem Ra wynosiła  $0,032 \mu\text{m}$ , a twardość kulek zawarta była w granicach  $60 \div 65$  HRC.

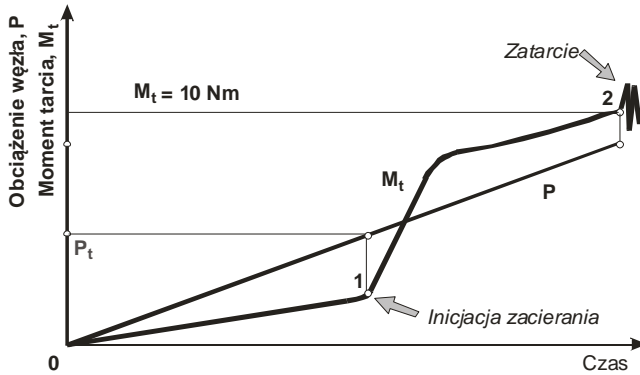
Do oceny właściwości przeciwwzartarcowych paliwa przyjęto obciążenie zacierające  $P_t$  [L. 19–20]. Obciążenie zacierające ( $P_t$ ) jest to obciążenie powodujące nagły wzrost oporów ruchu i powodujące rozpoczęcie procesu zacierania –

### Rys. 3.

Badania pod stałym obciążeniem wykonano według procedury nieznormalizowanej w następujących warunkach:

- prędkość obrotowa wrzeciona  $1450 \pm 20$  obr/min,
- obciążenie  $392$  N,
- czas badania  $3600$  s,
- temperatura otoczenia  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ .

Obserwacje mikroskopowe prowadzono z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego S 2460N (firmy Hitachi), a analizy składu pierwiastkowego śladów tarcia wykonano za pomocą mikroanalizatora rentgenowskiego Voyager 3050 (produkcji Noran Instruments). Wykonano także analizy śladów tarcia z użyciem profilografometru interferometrycznego CCI firmy Taylor Hobson.



Rys. 3. Wykres zmian momentu tarcia  $M_t$  ze wzrostem obciążenia P

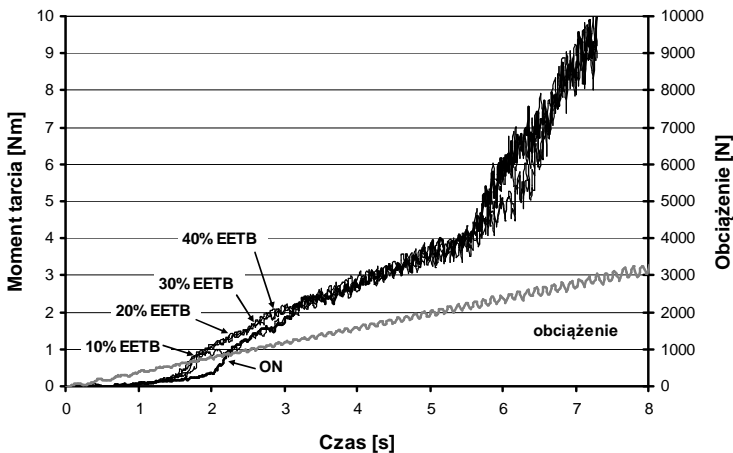
Fig. 3. The friction torque  $M_t$  changes during the increase of load P

Badaniom poddano olej napędowy i jego mieszaniny z EETB. Zawartość objętościowa EETB w ON wynosiła: 10, 20, 30 i 40%.

## WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

Przebiegi momentu tarcia w trakcie ciągłego narastania obciążenia w czterokulowym węźle tarcia przy smarowaniu olejem napędowym oraz mieszaniną oleju napędowego z EETB zestawiono na Rys. 4.

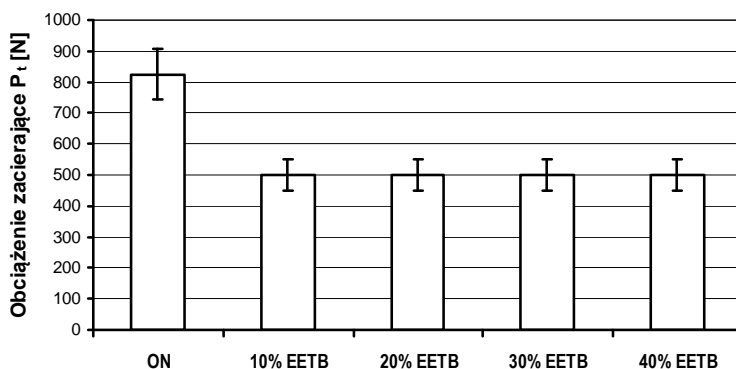
Dla mieszaniny oleju napędowego z EETB w ilości 10% zaobserwowano znaczne pogorszenie odporności na zacieranie. Przerwanie warstwy smarowej następowało niezależnie od ilości EETB po ok. 1,5 s.



Rys. 4. Przebiegi momentu tarcia dla czystego oleju napędowego (ON) oraz mieszanin oleju napędowego z EETB

Fig. 4. Friction torque curves for pure diesel oil and the mixture of diesel oil and ETBE

Dla każdej mieszaniny paliw wyznaczono obciążenie zacierające  $P_t$  –  
**Rys. 5.**



**Rys. 5. Obciążenie zacierające dla czystego oleju napędowego (ON) oraz mieszanin oleju napędowego z EETB wraz przedziałami ufności**

Fig. 5. Scuffing load for pure diesel oil (ON) and the mixture of diesel oil and ETBE with the confidence intervals

Jak wynika z **Rys. 5**, dodatek EETB obniża obciążenie zacierające w stosunku do czystego oleju napędowego o ok. 300 N. Dalszy wzrost stężenia EETB nie powodował już dalszego obniżenia obciążenia zacierającego. Przyczyna pogorszenia właściwości smarnych paliwa mogła po części wynikać z obniżenia jego lepkości. Jednak brak wpływu udziału EETB na obciążenie zacierające sugeruje, że utrata właściwości smarnych wynika ze zmiany oddziaływań pomiędzy środkiem smarowym, w tym przypadku paliwem, a powierzchnią tarcia. By to wyjaśnić, wykonano analizy śladów tarcia.

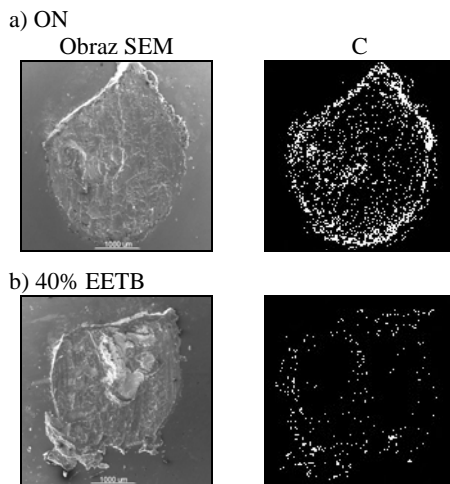
W **Tabeli 1** zestawiono wyniki analizy ilościowej EDS metodą bezwzorcową, ze śladu zużycia z obszaru  $100 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ .

W obrębie śladów tarcia smarowanych czystym olejem napędowym wykryto znacznie większą ilość węgla niż dla mieszaniny paliw (**Rys. 6**), a także wykryto śladowe ilości siarki. Natomiast w przypadku smarowania mieszaniną paliw stwierdzono mniejszą zawartość węgla oraz nie wykryto siarki na powierzchni tarcia. Brak siarki na powierzchni tarcia jest skutkiem jej mniejszej zawartości w paliwie. Tendencja do redukcji zawartości siarki w paliwach, pożądana ze względów ekologicznych, jest niekorzystna ze względu na pogorszenie właściwości smarnych paliwa.

**Tabela 1. Wyniki analizy ilościowej EDS [w % mas.]**

Table. 1. The results of EDS quantitative analysis

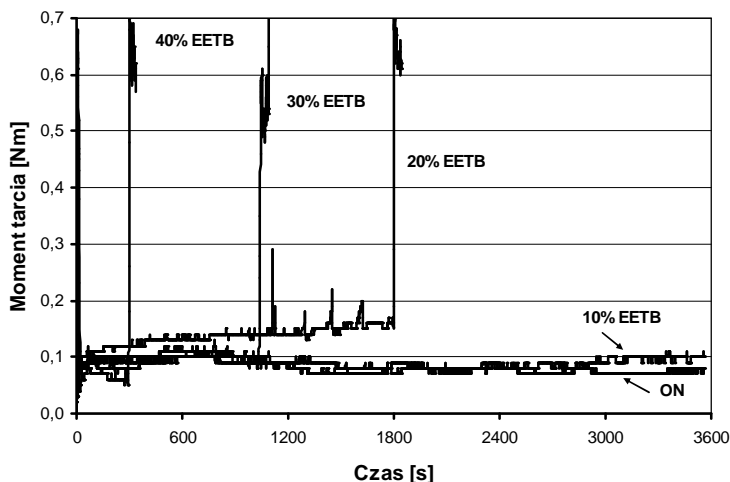
Próbka	C	O	S
ON	26,80	0,00	0,05
40% EETB	15,82	0,00	0,00



**Rys. 6. Obraz powierzchni tarcia po badaniu metodą czterokulową z ciągłym narastaniem obciążenia oraz rozkład C na powierzchni tarcia dla: a) czystego oleju napędowego (ON), b) mieszaniny 60% oleju napędowego i 40% EETB**

Fig. 6. SEM image of wear tracks after four ball tests with continuous increase of load and C distribution in surface layer for: a) pure diesel fuel, b) the mixture of 60% diesel and 40% ETBE

W następnej kolejności wykonano badania zużyciowe pod stałym obciążeniem. Wyniki przebiegów tarcia przy smarowaniu olejem napędowym oraz mieszaniną oleju napędowego z EETB zestawiono na **Rys. 7**.



**Rys. 7. Przebiegi momentu tarcia pod stałym obciążeniem 392 N dla czystego oleju napędowego (ON) oraz mieszanin oleju napędowego z EETB**

Fig. 7. Friction torque curves under constant load of 392 N for pure diesel oil and the mixture of diesel oil and ETBE

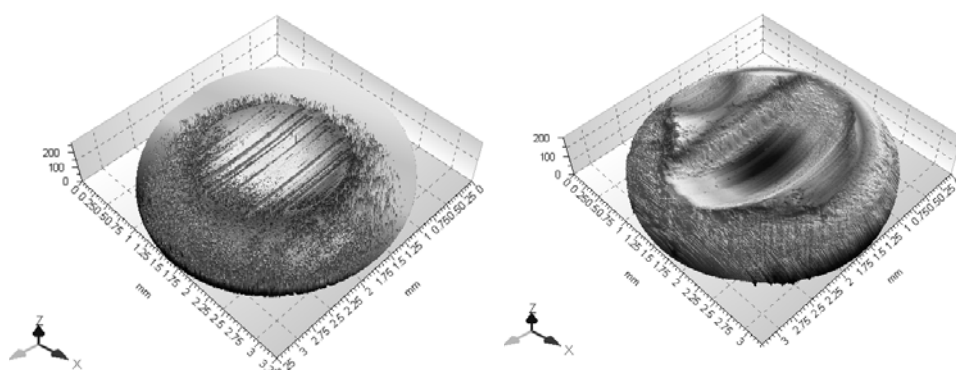


Pod stałym, stosunkowo niewielkim, obciążeniem (392 N) dodatek EETB do oleju napędowego powodował wzrost zużycia. Przy zawartości 20% lub większej czterokulowy węzeł tarcia ulegał zatarciu, gdyż w trakcie badania cała mieszanina wyparowywała łącznie z olejem napędowym. Zaobserwowano tendencję, że im większy udział EETB w oleju napędowym, tym są gorsze właściwości smarne paliwa.

Porównanie śladów zużycia na kulce dla czystego oleju napędowego oraz mieszaniny oleju napędowego z EETB pokazano na **Rys. 8**.

a) ON

b) 40% EETB



**Rys. 8. Obraz powierzchni tarcia po badaniu metodą czterokulową ze stałym obciążeniem: a) czysty olej napędowy, b) mieszanina oleju napędowego z 40% EETB**

Fig. 8. The image of wear scar after four ball test under constant load: a) pure diesel fuel, b) the mixture of 60% diesel and 40% ETBE

## PODSUMOWANIE

Wyniki badań tribologicznych zrealizowane za pomocą aparatu czterokulowego jednoznacznie wykazały, że mieszanina oleju napędowego z eterem etylo-tert-butylowym ma gorsze właściwości smarne niż czysty olej napędowy. Ponadto wykazano, że im większy udział EETB w paliwie, tym jego właściwości smarne są gorsze. Zastosowanie mieszaniny paliw doprowadziło do zacierania elementów pompy wtryskowej rozdzielaczowej CAV DPA. Zatem przy stosowaniu EETB jako składnika paliwa do silnika wysokoprężnego należy rozważyć stosowanie dodatkowych komponentów poprawiających jego właściwości smarne.

## LITERATURA

1. Sahin Z., Durgun O.: Prediction of the effects of ethanol-diesel fuel blends on diesel engine performance characteristics, combustion, exhaust emissions, and cost. *Energy&Fuels* 2009; 23:1707–1717.

2. Qi DH, Chen H., Geng L.M., Bian Y.Z.: Effect of diethyl ether and ethanol additives on the combustion and emission characteristics of biodiesel-diesel blended fuel engine. *Renewable Energy* 2011; 36:1252-1258.
3. Erwin J.: Investigation of the Ignition Quality of Blends of Diethylether with D-2 Diesel Fuel and Ethanol. Special Report Prepared by Southwest Research Institute for the National Renewable Energy Laboratory. Golden, CO. (1997).
4. Kwanchareon P., Luengnaruemitchai A., Jai-In S.: Solubility of a diesel-biodiesel-ethanol blend, its fuel properties, and its emission characteristics from a diesel engine. *FUEL* 2007; 86:1053-1061.
5. Lapuerta M., Garcia-Contreras R., Campos-Fernandez J., Dorado M.P.: Stability, Lubricity, Viscosity, and Cold-Flow Properties of Alcohol-Diesel Blends. *Energy&Fuels* 2010; 24:4497- 4502.
6. Górski K., Sen A., Lotko W., Swat M.: Effects of ethyl-tert-butyl ether addition on the physicochemical properties of diesel oil and particulate matter and smoke emissions from diesel engines. *FUEL*. Vol 103/2013, p. 1138-1143. Elsevier 2012.
7. Menezes EW, Silva R, Cataluña R, Ortega RJC, Effect of ethers and ether/ethanol additives on the physicochemical properties of diesel fuel and on engine tests. *FUEL* 2006;85:815-822.
8. Li T., Suzuki M., Ogawa H.: Effects of ethyl tert-butyl ether addition to diesel fuel on characteristics of combustion and exhaust emissions of diesel engines. *FUEL* 2009;88:2017-24.
9. Yee K.F., Mohamed A.R., Tan S.H.: A review on the evolution of ethyl tert-butyl ether (ETBE) and its future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013; 22, pp. 604-620.
10. Bailey B., Eberhardt J., Goguen S., Erwin J.: Diethyl Ether as a Renewable Diesel Fuel. SAE Paper 972978.
11. Górski K., Asok K. Sen: Impact of Ethyl-Tert-Butyl Ether (ETBE) Addition to Diesel Oil on Engine Knock. Nova Science Publishers USA, 2013.
12. Lotko W., Górski K., Longwic R., Gielniewski R., Orliński W.: Grant Nr NN509 074837, pn. „Badania procesów wtrysku i spalania w silniku o zapłonie samoczynnym zasilanym mieszaninami oleju napędowego i eteru etylo-tert-butylowego, 2009-2011.
13. Lotko W., Górski K., Longwic R.: Nieustalone stany pracy silnika wysokoprężnego zasilanego olejem napędowym z eterem etylo-tert-butylowym, WKiŁ, Warszawa 2010.
14. Lotko W., Górski K.: Zasilanie silnika wysokoprężnego mieszaninami ON i EETB, WNT, Warszawa 2011.
15. Lacey P.I., Mason L.R.: Fuel Lubricity. Statistical analysis of literature data, SAE Technical Paper. Ser. 2000, 2000-01-1917.
16. Lotko W., Górski K., Przedlacki M.: Parametry smarności i odporności na zacieraanie mieszanin oleju napędowego z eterem etylo-tert-butylowym, Archiwum Motoryzacji Nr 4, 2009.
17. Lotko W.: Rozwój układów zasilania silników wysokoprężnych, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2007.
18. Niewiarowski K.: Tłokowe silniki spalinowe, WKiŁ, Warszawa 1987.
19. Michalczewski R., Szczerek M., Tuszynski W., Wulczyński J.: Aparat czterokulowy do badania właściwości przeciwzużyciowych, przeciwzatarciowych i po-

wierzchniowej trwałości zmęczeniowej z możliwością podgrzewania środka smarowego. Tribologia. Nr 1, 2009, s. 113–127.

20. Tuszyński W., Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M.: Effect of ageing automotive gear oils on scuffing and pitting. Tribology International. 41 (2008), s. 875–888.

### Summary

**The paper is directed at the determination of the cause of scuffing in an injection pump fuelled with the mixture of diesel fuel and ethyl tert-butyl ether (ETBE). Based on performed theoretical studies, it was suspected that the cause of scuffing was the decrease in lubricating properties of fuel. To check it, tribological tests were performed using a four-ball apparatus. Based on the performed tests it was stated that the addition of 10% of ethyl tert-butyl ether significantly decreases lubricating properties of the fuel (by several percent). It was the main reason for premature scuffing of the injection pump parts.**

