

Zbigniew Stępień, Wiesława Urzędowska, Stanisław Oleksiak  
*Instytut Nafty i Gazu, Kraków*

Jan Czerwiński  
*University of Applied Sciences (AFHB), Szwajcaria*

Otto Andersen  
*Western Norway Research Institute (Vestlandsforskning), Norwegia*

## Oddziaływanie olejów napędowych zawierających FAME na procesy degradacji smarowych olejów silnikowych i wielkość emisji cząstek stałych

### Wstęp

Powszechnie wiadomo, że poza niewątpliwymi zaletami, biopaliwa charakteryzują się szeregiem niekorzystnych właściwości, spośród których część wiąże się z większym niż w przypadku tradycyjnych olejów napędowych (zawierających do 7% (V/V) FAME) rozcieńczeniem smarowego oleju silnikowego oraz koniecznością jego częstszej wymiany. Nadmierne rozcieńczenie oleju silnikowego prowadzi do wielu poważnych problemów, w tym stopniowego ograniczania właściwości użytkowo-eksploatacyjnych oleju, poprzedzającego jego całkowitą degradację – poprzez utlenienie i polimeryzację nienasyconych składników zawartego w nim paliwa.

W przypadku stosowania biopaliw, ich parametry (podwyższona gęstość, lepkość i niższa lotność oraz związane z tym omywanie przez rozpylane strugi paliwa ścianek tulei cylindrowych) sprzyjają procesowi intensyfikacji ściekania, a następnie przedostawania się paliwa z biokomponentem do miski olejowej silnika. Znaczące nasilenie procesu rozcieńczenia oleju silnikowego ma miejsce przy wykorzystaniu układu wtrysku paliwa typu *common rail* do wspomagania aktywnej regeneracji filtra cząstek stałych DPF (*Diesel Particulate Filter*) w układzie wylotowym silnika. Stosowanie takiego rozwiązania technicznego jest obecnie bardzo rozpowszechnione, jednak jego wadą jest to, że dodatkowy, opóźniony wtrysk paliwa niespalanego

w silniku (mający na celu podgrzanie spalin przed katalizatorem, poprzedzającym DPF) może przyczyniać się do bardzo intensywnego rozcieńczenia oleju silnikowego. Ma to miejsce w zwłaszcza w przypadku miejskiej eksploatacji pojazdu, charakteryzującej się niskimi obciążeniami silnika, kiedy to wzrasta częstotliwość koniecznych regeneracji DPF – nie zawsze możliwych do zainicjowania ze względu na niskie temperatury gazów wylotowych, nawet pomimo stosowania podgrzewania paliwem. Implikacje wyżej opisanych procesów to:

- gwałtowne obniżanie lepkości oleju smarowego,
- formowanie się w oleju szlamów i laków,
- wyczerpanie rezerwy alkalicznej oleju, a zatem drastyczny spadek liczby zasadowej,
- gwałtowny wzrost liczby kwasowej, wskazujący na degradację oleju smarowego,
- wyplukiwanie niektórych metali (np. miedzi i ołowiu) z panewek łożysk ślizgowych,
- zatykanie się filtrów olejowych szlamami.

Badania przeprowadzone przez różne światowe ośrodki zgodnie wskazują na progresywnie postępujący proces degradacji silnikowego oleju smarowego rozcieńczonego biopaliwem [2, 3, 5, 8, 9].

Precyzyjnie działające, zasobnikowe układy wtrysku paliwa typu *common rail* (CR) są obecnie uważane za

najbardziej perspektywiczne systemy zasilania silników z ZS. Na taką opinię wpływa zarówno ich kluczowe znaczenie w ograniczaniu emisji szkodliwych składników spalin i wielkości zużycia paliwa, jak i duży potencjał przy optymalizacji parametrów użytkowych silnika, w zakresie zależnym od potrzeb [1, 4, 6, 7, 9]. Zastosowane w układach typu CR środki techniczne decydujące o ich zaletach to przede wszystkim: maksymalne ograniczenie średnicy otworków rozpylających paliwo oraz wysokie ciśnienie jego wtrysku. Przedmiotowe otworki tworzą wyloty kanalików, których kształt (geometria) ma zasadniczy wpływ na linie pola prądu przepływu i w konsekwencji – na rozdrobnienie paliwa na krople oraz ich rozproszenie w ładunku powietrza, a następnie odparowanie w komorze spalania. Dodatkowo, stosowanie stożkowych kanałów wylotowych rozpylaczy pozwala na zwiększenie prędkości strumienia wypływającego paliwa, a co za tym idzie – także jego pędu, co znacząco poprawia jakość rozpylenia, wpływając na lepsze wymieszanie paliwa z powietrzem w komorze spalania. Jednak wszystkie ww. rozwiązania konstrukcyjne i środki technologiczne mogą nie przynieść oczekiwanego efektu na skutek osadów powstających na ściankach kanałów rozpylaczy, spowodowanych działaniem paliwa i zależnych głównie od jego właściwości.

Końcowa część rozpylacza układu CR narażona jest na oddziaływanie wysokich temperatur procesów spalania, co podwyższa ryzyko ograniczenia natężenia wypływu i zniekształcenia strugi rozpylanego paliwa na skutek

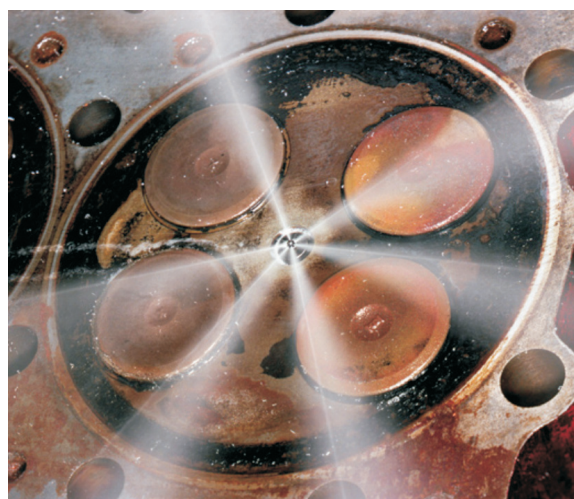
osadów koksowych, tworzących się wewnątrz kanalików i wokół samych otworków wylotowych (rysunek 1). Lako-we osady, powstające na powierzchniach wewnętrznych elementów roboczych wtryskiwaczy paliwa, negatywnie wpływają na dynamikę ich pracy – zaburzając czasy oraz ciśnienia poszczególnych etapów wtrysku wielofazowego. Skutkiem powyższych zjawisk są różne dysfunkcje działania układów CR [1, 6, 7].

Rozpowszechnienie niskosiarkowych olejów napędowych i systematycznie wzrastający udział zawartych w nich biokomponentów doprowadził do zintensyfikowania tworzenia osadów; zarówno na wewnętrznych powierzchniach elementów pomp i wtryskiwaczy, jak i zakoksowujących otwory dozujące paliwo rozpylaczy wtryskiwaczy. Obecnie wytwarzane oleje napędowe zawierają rozmaite związki chemiczne o podwyższonej kwasowości. W różnym stopniu nienasycone kwasy tłuszczowe są powszechnie używane jako dodatki smarnościowe. Jak wykazano, kwasy takie łatwo reagują z jonami metali (stanowiącymi zanieczyszczenia paliwa) – formując mydła i osady. Zawarte w oleju napędowym FAME mogą dodatkowo sprzyjać tworzeniu osadów na rozpylaczach wtryskiwaczy, na skutek występujących w nich kwasowych zanieczyszczeń, powstałych podczas produkcji FAME oraz tych uformowanych poprzez autokatalityczny rozpad estrów tłuszczowych z udziałem jonów metali. Dlatego też skutki współdziałania zmieniających się paliw (w tym biopaliw) z nowoczesnymi konstrukcjami silników spalinowych muszą podlegać nieustannym badaniom i ocenom.

a)



b)



Rys. 1. Ograniczenia wypływu i zniekształcenia strug rozpylanego paliwa na skutek osadów koksowych, tworzących się wewnątrz kanalików i wokół samych otworków wylotowych wtryskiwaczy: a) wtryskiwacz „czysty”, b) wtryskiwacz „zakoksowany” (Lubrizol Corporation)

## Założenia prowadzenia badań

Podstawowym założeniem symulacyjnych badań silnikowych było określenie wpływu biopaliw na procesy degradacji silnikowego oleju smarowego. Oceniano zarówno rodzaj, wielkość, jak i postępujące w czasie zmiany ilościowe oraz jakościowe wymienionych procesów. Ponadto, rozeznano wpływ poziomu zawartych w paliwie biokomponentów (FAME) na szybkość i sposób degradacji oleju smarowego. Przedmiotem badania były też procesy zakoksovania rozpylaczy wtryskiwaczy oraz tworzenie się osadów na zewnętrznych i wewnętrznych powierzchniach elementów wtryskiwaczy układu wtrysku paliwa typu CR.

Przyjęto, że jako smarowy olej silnikowy badaniom poddawany będzie olej spełniający wewnętrzne specyfikacje firmy FORD, będącej wytwórcą silnika wykorzystywanego do prowadzenia symulacyjnych badań stanowiskowych. W konsekwencji, wybrano zalecany do silnika typu FORD 2.0i 16V Duratorq TDCi olej klasy SAE 5W/30, spełniający (według deklaracji jego producenta) wymagania klasyfikacji API: SJ, ACEA: A-1/B-1 oraz Ford: WSS-M2C-913B.

Formulacja tego produktu obejmuje:

- olej bazowy z hydrokrakingu, spełniający według specyfikacji API wymagania gr. II<sup>+</sup>,
- główne składniki pakietu jakościowego – sulfoniany i fenolany wapnia oraz magnezu,
- dodatek przeciwzużyciowy, typu alkiloditiofosforan cynku.

Jako paliwo odniesienia, do badań przyjęto wysokiej jakości niskosiarkowy olej napędowy, spełniający (zgodnie ze świadectwem jakości jego producenta) wymagania normy PN-EN 590:2009. W oparciu o ww. paliwo oraz bioester B100 (spełniający wymagania normy PN-EN 14214), do badań przygotowano olej napędowy zawierający 7% (V/V) RME – oznaczony jako B7, oraz biopaliwa zawierające odpowiednio 20% i 30% (V/V) RME – oznaczone jako B20 i B30. Badania obejmowały trzy kolejne silnikowe testy stanowiskowe, w których monitorowano współdziałanie wytypowanego silnikowego oleju smarowego z jednym z trzech paliw, tzn.: B7, B20, lub B30.

## Silnikowe badania symulacyjne

Badania przeprowadzono przy wykorzystaniu uniwersalnego stanowiska badawczo-testowego, wyposażonego w nowoczesny silnik wysokoprężny typu HSDI marki FORD, noszący oznaczenie fabryczne 2.0i 16V Duratorq TDCi [6, 9] (rysunek 2). Jest to silnik z bezpośrednim wtryskiem paliwa, zasilany wysokociśnieniowym układem wtrysku paliwa CR.

W zakresie aparatury badawczo-pomiarowej, stanowisko wyposażono w dymomierz AVL Smoke Meter 415S, umożliwiający pomiary zadymienia. Do pomiarów wielkości masowej emisji cząstek stałych (PM) stosowano mini

tunel AVL SPC 472 Smart Sampler. Długotrwałe, silnikowe testy symulacyjne były prowadzone zgodnie z procedurą badawczą składającą się z 4-fazowego, powtarzalnego cyklu badania, odzwierciedlającego przeciętne warunki pracy silnika podczas eksploatacji pojazdu w ruchu miejskim o małym natężeniu [6, 9] (tablica 1).

Czas prowadzenia testu ustalono na 400 godzin. Próbkę oleju pobierano i poddawano analizie na początku testu, a następnie po 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 i 400 godzinach rzeczywistej pracy silnika w teście.



Silnik: **FORD 2.0i 16V Duratorq TDCi**  
 Układ cylindrów: **rzędowy, pionowy**  
 Liczba cylindrów: **4**  
 Typ układu rozrządu: **DOHC/4VPC**  
 Pojemność skokowa: **1998 cm<sup>3</sup>**  
 Moc maks.: **96 kW/3800 obr./min**  
 Maks. moment obrotowy: **330 Nm/1800 obr./min**  
 Układ wtrysku paliwa: **common rail**  
 Napędzanie cylindrów: **turbodoładowany**  
 Emisja: **EURO IV**  
 Pojemność układu smarowania: **6,0 dm<sup>3</sup>**

Rys. 2. Stanowisko badawczo-testowe z silnikiem FORD 2.0i 16V Duratorq TDCi

Tablica 1. Parametry 4-fazowego cyklu silnikowego

Nr fazy	Czas [s]	Prędkość obrotowa silnika [obr./min]	Obciążenie silnika [%]
1	30	800	~0
2	300	1800	60
3	120	3000	50
4	120	1500	30

Podstawę przyjętego zakresu i sposobu badań degradacji oleju smarowego oraz kryteriów jego oceny w długotrwałych, symulacyjnych testach silnikowych stanowił zbiór powszechnie stosowanych, standardowych metod badań. Jednak, ze względu na nie zawsze jednoznaczne wyniki ocen przedmiotowego procesu za pomocą takich metod, podjęto próbę bardziej wielokierunkowego, a zarazem kreatywnego podejścia do rozpatrywanego zagadnienia.

Mając na uwadze nieuchronne rozcieńczanie oleju silnikowego paliwem, do monitorowania zmian jego właściwości użytkowych podczas testów silnikowych wytypowano proces, który ze względu na udział w paliwie FAME będzie decydującym dla tempa postępującej degradacji oleju. Procesem tym jest stabilność oksydacyjna, którą badano w sposób bezpośredni; zarówno w warunkach dużej objętości (zmodyfikowana metoda ASTM D 7545 – wykorzystująca aparat PetroOXY), jak i w „cienkiej warstwie” (zmodyfikowana procedura ASTM D 4742 – z wykorzystaniem bomby wirującej). Właściwości użytkowe oleju silnikowego eksploatowanego w warunkach „cienkiej warstwy”, w wysokiej temperaturze i przy dużych szybkościach ścinania, badano w teście HTHS.

Wykorzystywane metody monitorowania zmian właściwości użytkowych oleju podczas testów symulacyjnych zestawiono w tablicy 2.

Ocenę wielkości zakoksovania rozpylaczy wtryskiwaczy oraz osadów utworzonych na wewnętrznych powierzchniach ich kluczowych, precyzyjnych elementów prowadzono przy wykorzystaniu pomiarów wybranych parametrów eksploatacyjno-diagnostycznych silnika, w tym wielkości zadymienia oraz masowej, jednostkowej emisji cząstek stałych. Pomiaru tych parametrów dokonywano po 10 godzinach prowadzenia testu (po ustabilizowaniu parametrów działania układu wtrysku paliwa typu CR), w którym do każdej próby stosowano nowy komplet wtryskiwaczy, a także po jego zakończeniu. Masową emisję cząstek stałych mierzono zgodnie z wymaganiami procedury badawczej ISO-8178-1, w dwóch różniących się parametrami warunkach (fazach pomiarowych) pracy silnika, scharakteryzowanych jego obciążeniem i prędkością obrotową. Parametry pracy silnika dobrano w ten sposób, aby odzwierciedlały najbardziej charakterystyczne stany jego działania z punktu widzenia masowej emisji PM oraz różnicy ich składu. Przedmiotowe warunki pracy (w dwóch fazach pomiarowych) to:

- 20 Nm, 3800 obr./min – parametry odzwierciedlające pracę nisko obciążonego silnika przy wysokiej prędkości obrotowej,
- 120 Nm, 1000 obr./min – parametry odzwierciedlające pracę silnika przy wysokich obciążeniach i niskich prędkościach obrotowych.

Wszystkie pomiary masowej, jednostkowej emisji cząstek stałych były powtarzane trzykrotnie, a uśrednione wyniki tych badań zawarto w tablicy 3.

Tablica 2. Zestawienie metod monitorowania zmian właściwości oleju silnikowego

Lepkość kinematyczna	PN-EN ISO 3104
Wskaźnik lepkości	ASTM D 2270
Oznaczanie lepkości dynamicznej HTHS	CEC L-36-90
Liczba kwasowa	ASTM D 664
Całkowita liczba zasadowa	ASTM D 4739
Oznaczenie rozcieńczenia paliwem	ASTM D 3524
Zawartość wody	ASTM D 95
Zawartość pierwiastków pochodzących z pakietu jakościowego	ASTM D 4951
Zawartość pierwiastków pochodzących ze zużycia elementów silnika	ASTM D 5185
Zawartość zanieczyszczeń nierozpuszczalnych	ASTM D 893
Oznaczenie zawartości sadzy	DIN 51 452
Odporność na utlenianie w dużej objętości	ASTM D 7545 (modyfikacja PetroOXY)
Odporność na utlenianie w cienkiej warstwie oleju	ASTM D 4742 (modyfikacja)
Stopień oksydacji (analiza FT-IR)	Metoda własna INiG, oparta na ASTM D 2412

### Uzyskane wyniki – podsumowanie

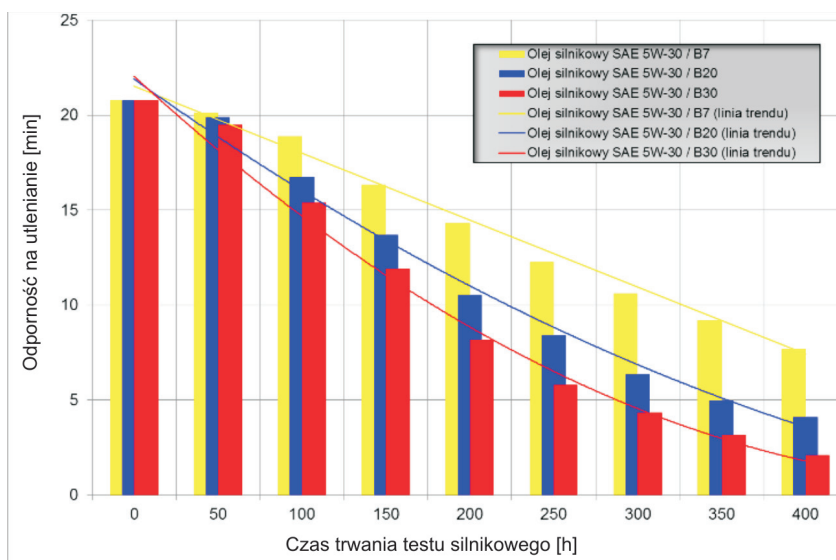
Poniżej przedstawiono wybrane wyniki zmian potencjału eksploatacyjnego smarowego oleju silnikowego współdziałającego z trzema różnymi paliwami w warunkach długotrwałych, symulacyjnych testów silnikowych (rysunki 3–8). Prezentując wyniki, szczególną uwagę poświęcono analizie zmian właściwości użytkowo-eksploatacyjnych, ocenianych według nowych lub zmodyfikowanych metod badawczych, stanowiących rozszerzenie względem tradycyjnych metod oceny szeroko pojętej degradacji oleju.

Przeprowadzone badania wykazały w sposób jednoznaczny, że wraz ze wzrostem udziału FAME w paliwie stosowanym do zasilania silnika, zwiększa się szybkość procesu degradacji używanego do jego smarowania oleju silnikowego. Na taką tendencję wskazały zmiany wszystkich monitorowanych właściwości oleju.

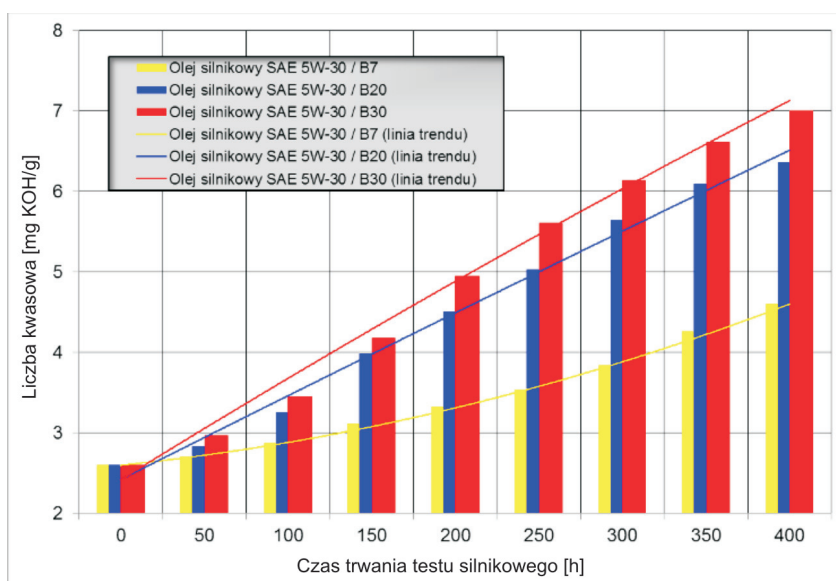
Podczas testu silnikowego, proces utleniania oleju w dużej objętości, oceniany w sposób bezpośredni na stanowisku wyposażonym w aparat PetroOXY, przebiegał z różną intensywnością – zależnie od stosowanego do zasilania silnika paliwa (rysunek 3). Najszybciej utlenianie postępowało w przypadku oleju współdziałającego z paliwem B30, a najwolniej w oleju współdziałającym z B7; jednak każdorazowo zachodzące w czasie zmiany wykazywały w przybliżeniu charakter liniowy. Podobną tendencję zaobserwowano w przypadku pośredniej oceny stopnia utraty stabilności oksydacyjnej oleju w dużej objętości, tj. poprzez zmiany liczby kwasowej (rysunek 4) oraz ocenę zmian widma IR (rysunek 5). Do pośrednich metod oceny szybkości degradacji oleju silnikowego ze względu na postępujący proces utleniania należy zaliczyć również lepkość kinematyczną. Oceniając postępujący w czasie proces degradacji oleju silnikowego na podstawie zmian lepkości kinematycznej (rysunek 6), należy stwierdzić, że po 100 godzinach trwania testu silnikowego następuje zdecydowane przyspieszenie tego procesu, przy czym wzrost intensywności jest ściśle powiązany z rodzajem stosowanego w teście paliwa (udziału zawartego

w nim FAME). Przedstawione wykresy pokazują, że spadek lepkości oleju silnikowego w wyniku rozcieńczania paliwem oraz mechanicznego ścinania modyfikatora lepkości, który ma miejsce w początkowym etapie testu, zostaje zdominowany przez proces przyrostu lepkości w wyniku postępującej degradacji, w tym utleniania oleju. Właśnie ten drugi etap pozwala na wyraźne rozróżnienie przebiegu procesu utleniania, wykazując, że wzrost udziału biokomponentu FAME w paliwie jest czynnikiem decydującym o degradacji oleju silnikowego.

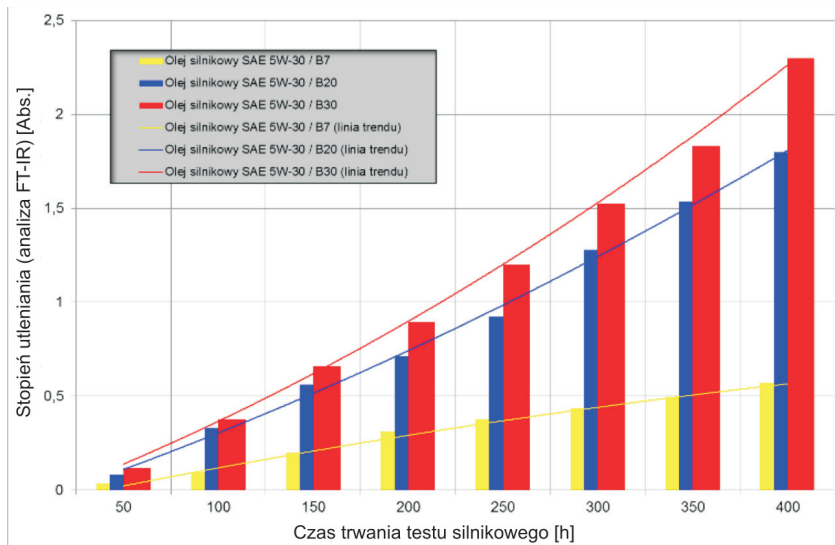
Podczas próby silnikowej w warunkach cienkiej warstwy proces utraty stabilności oksydacyjnej oleju silnikowego, oceniany na stanowisku z bombą wirującą,



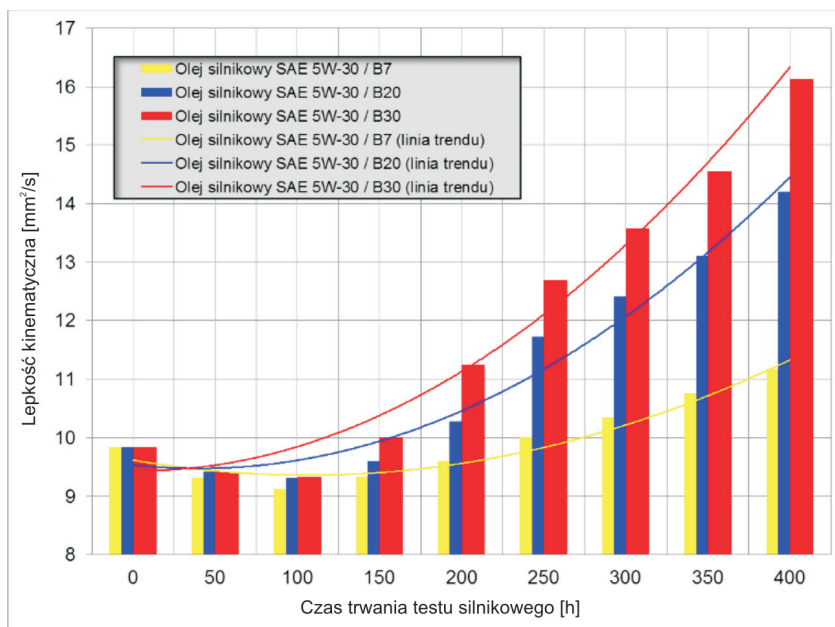
Rys. 3. Zmiany odporności na utlenianie badanego oleju smarowego



Rys. 4. Zmiany liczby kwasowej badanego oleju smarowego



Rys. 5. Zmiany stopnia utlenienia badanego oleju smarowego (analiza FT-IR)



Rys. 6. Zmiany lepkości kinematycznej badanego oleju smarowego

we wszystkich przeprowadzonych testach silnikowych (dla trzech różnych paliw) przebiegał z większą dynamiką do około  $\frac{3}{4}$  czasu trwania testu, po czym zmiany postępowały wolniej (wykres przybiera charakter krzywej wykładniczej), co zaprezentowano na rysunku 7. Także w tym przypadku utlenianie oleju silnikowego najintensywniej postępowało w obecności paliwa B30, a najwolniej – dla B7.

Podsumowując należy zauważyć, że o ile stopień degradacji oleju silnikowego współpracującego z paliwem B7 i paliwami z wyższym udziałem FAME (B20 i B30) w wyniku procesu utraty stabilności oksydacyjnej był zauważalny już od pierwszych godzin testu silnikowego,

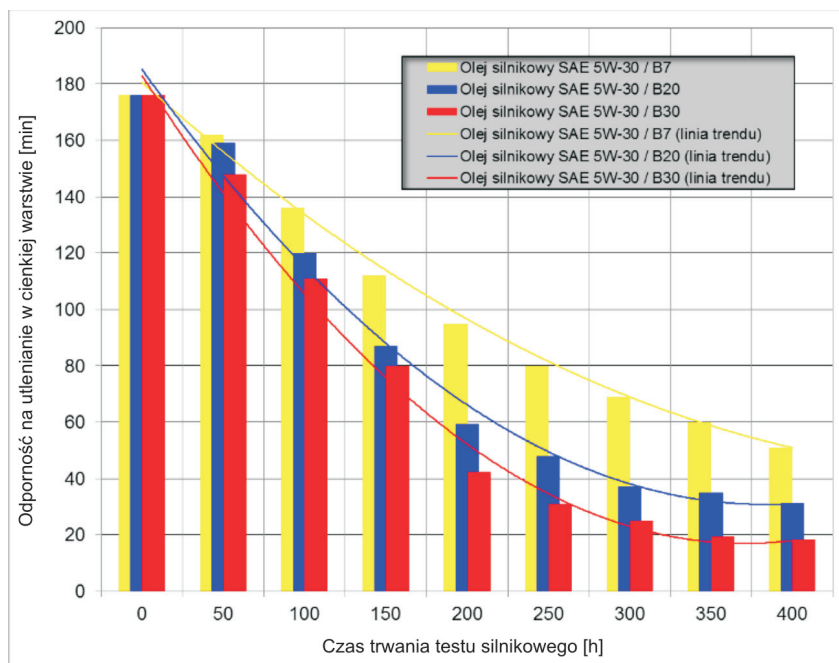
to rozróżnienie szybkości degradacji oleju współpracującego z paliwem B20 i B30 następowało dopiero po ok. 200 h testu.

W przypadku stosowania do zasilań silnika paliwa B7, monitorowanie lepkości dynamicznej HTHS podczas testów silnikowych wykazało jej ciągłe obniżanie w czasie – co może stwarzać zagrożenie przerwania warstewki smarnej i skutkować dalszymi konsekwencjami. Przyczyną tego zjawiska jest rozcieńczanie oleju silnikowego paliwem – zwiększone ze względu na udział biokomponentu. W przypadku stosowania w testach silnikowych paliw B20 lub B30 obserwuje się spadek lepkości dynamicznej HTHS oleju silnikowego do ok. 200 godzin czasu trwania testu, po czym następuje jej wzrost; w przypadku B30 na tyle intensywny, że stanowi o zdecydowanym pogorszeniu warunków smarowania (rysunek 8). W przypadku tych paliw, w miarę wydłużania eksploatacji oleju, proces rozcieńczania paliwem zostaje zdominowany przez przyspieszone utlenianie.

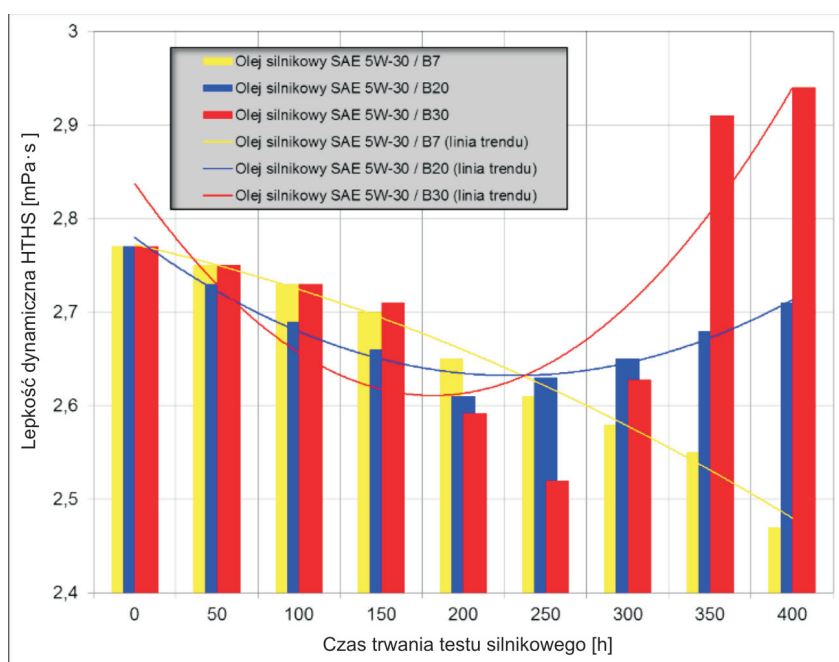
Zwiększanie zawartości FAME w oleju napędowym skutkuje coraz intensywniejszym zakoksoowaniem rozpylaczy wtryskiwaczy, a więc także narastającą ilością osadów – tworzonych wokół i wewnątrz otworków wylotowych paliwa na końcówkach rozpylaczy oraz na stożkowych zakończeniach iglic, współpracujących z gniazdami studzienek w korpusach rozpylaczy. Na

zewnątrznych powierzchniach końcówek rozpylaczy, wokół otworków rozpylających paliwo tworzyły się osady koksowe, o grubości tym większej, im większa była zawartość FAME w stosowanym paliwie – często ograniczające lub zaburzające jego wypływ z przedmiotowych otworków (tablica 3). Osady te mogły mieć wpływ na ilość, zasięg i postać strug wtryskiwanego do komór spalania silnika rozpylonego paliwa, a tym samym na czasowy i jakościowy przebieg dynamicznych procesów wtryskiwania jego precyzyjnie dozowanych dawek.

Przy 20% (V/V) oraz szczególnie przy 30% (V/V) zawartości FAME w biopaliwie zaobserwowano pokrywanie się wewnętrznych elementów składowych rozpy-



Rys. 7. Zmiany odporności na utlenianie w cienkiej warstwie badanego oleju smarowego



Rys. 8. Zmiany lepkości dynamicznej (HTHS) badanego oleju smarowego

laczego warstwą lepkiej substancji żywicznej, o kolorze miodowym. Największa jej grubość występowała na powierzchniach elementów omywanych przez przepływające paliwo, w tym iglic rozpylaczy. Mogło to mieć wpływ na zmniejszanie dynamiki pracy wtryskiwaczy, a zatem na stopniowe rozregulowywanie ilościowej charakterystyki dzielonej dawki paliwa w czasie. Jak stwierdzono podczas ocen wtryskiwaczy po zakończeniu testów (paliwo B30), osady żywiczne powodowały też we wtryskiwaczach iglic

















istotny wzrost emisji PM połączony był ze zmianą tendencji w zakresie oceny jej wielkości, w odniesieniu do zawartości FAME w paliwie (im większy udział FAME w paliwie tym wyższa emisja PM). W znacznej mierze należy to tłumaczyć zarówno progresywnie narastającym w czasie zakoksoowaniem rozpylaczy wtryskiwaczy w miarę wzrastającego udziału FAME w paliwie, jak i powstałymi na wewnętrznych elementach wtryskiwaczy żywicznymi osadami (tablica 3).

co najmniej okresowe unieruchamianie (zawieszanie) grzybków sterujących, stanowiących element zaworów elektromagnetycznych. Osadami o podobnym charakterze były pokryte również walcowe części prowadzące iglic, co zaburzało ich szybkość reakcji na zmiany ciśnienia paliwa w kanałkach sterujących rozpylacza i utrudniało ich płynne poruszanie w korpusach rozpylaczy. W konsekwencji miało to wpływ na sterowane elektroniczno-hydraulicznie procesy przepływu paliwa przez wtryskiwacze, a także na wielkość wtryskiwanych dawek paliwa; zarówno w poszczególnych ich fazach, jak i całkowitych.

Utrudnianie ruchliwości iglic w korpusach rozpylaczy, w wyniku powstających na ich powierzchniach roboczych lepkich osadów żywicznych, prowadziło do możliwości podciekania rozpylaczy. Osady te tworzyły się tym intensywniej, im większy był udział FAME w stosowanym paliwie.

W tablicy 3 i na rysunku 9 przedstawiono zmiany masowej, jednostkowej emisji PM, będące wynikiem intensyfikacji procesu zakoksoowania wtryskiwaczy układu wtrysku paliwa CR na skutek coraz większego udziału FAME w paliwach stosowanych do zasilania silnika. Początkowe pomiary emisji PM (przed testami) wykazały, że – niezależnie od prędkości obrotowej i wielkości obciążenia silnika – maleje ona wraz ze wzrostem udziału FAME w paliwie. Z kolei w przypadku analogicznych pomiarów wykonanych po zakończeniu testów odnotowano wzrost emisji PM dla każdego z badanych paliw (rysunek 9a, b). Ten

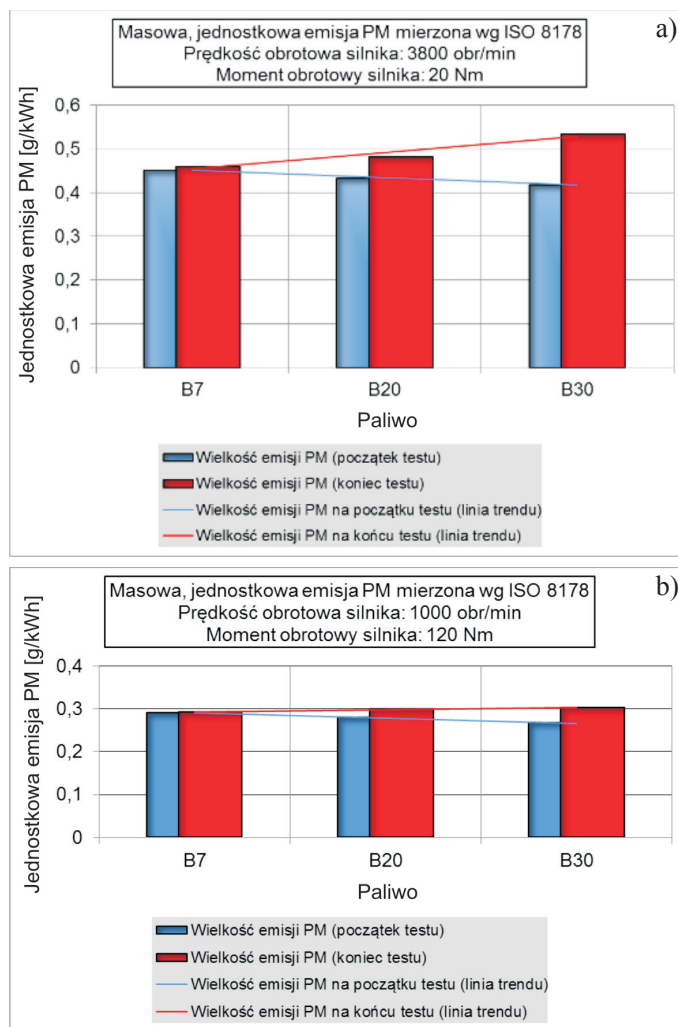
Tablica 3. Wyniki ocen wielkości emisji PM, związanej ze stopniem zakoksowania wtryskiwaczy układu CR, zależnym od zastosowanego paliwa

Paliwo	Emisja PM przy 3800 obr./min i 20 Nm [g/kWh]	Emisja PM przy 1000 obr./min i 120 Nm [g/kWh]	
ON zawierający 7% RME (początek testu)	0,451	0,290	
ON zawierający 7% RME (koniec testu)	0,460	0,292	
ON zawierający 20% RME (początek testu)	0,432	0,279	
ON zawierający 20% RME (koniec testu)	0,482	0,298	
ON zawierający 30% RME (początek testu)	0,417	0,266	
ON zawierający 30% RME (koniec testu)	0,534	0,303	
Końcówki nowych wtryskiwaczy (przed testem)			
			
Końcówki wtryskiwaczy po teście (paliwo: ON zawierający 7% RME, olej smarujący: 5W/30, spełniający wymagania klasyfikacji API: SJ oraz ACEA: A-1/B-1)			
			
Końcówki wtryskiwaczy po teście (paliwo: ON zawierający 20% RME, olej smarujący: 5W/30, spełniający wymagania klasyfikacji API: SJ oraz ACEA: A-1/B-1)			
			
Końcówki wtryskiwaczy po teście (paliwo: ON zawierający 30% RME, olej smarujący: 5W/30, spełniający wymagania klasyfikacji API: SJ oraz ACEA: A-1/B-1)			
			



Przyczyniło się to do pogorszenia jakości rozpylania paliwa, w tym zniekształcenia i zwiększenia zasięgu każdej jego pojedynczej strugi, oraz do zaburzeń w dynamice funkcjonowania wtryskiwaczy. Opisane deformacje rozpylanych przez otwory wtryskiwaczy strug paliwa, poza innymi skutkami, powodowały też omywanie ścianek cylindrów paliwem, które spływając do miski olejowej rozcieńczało znajdujący się tam olej smarowy – przyspieszając jego degradację. Większe przyrosty emisji PM stwierdzono podczas pomiarów prowadzonych dla wyższych prędkości obrotowych i niższego obciążenia silnika. W takich warunkach czas spalania ładunku w komorach silnika jest krótszy, co skutkuje niepełnym spalaniem mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrach silnika.

Konsekwencją stwierdzonego po zakończeniu testów znacznego pogorszenia pierwotnych parametrów użytkowo-eksploatacyjnych układu *common rail* (grube osady w obszarze otworów wylotowych oraz na wewnętrznych elementach rozpylaczy) był duży wzrost masowej, jednostkowej emisji PM. Przedmiotowa emisja – niezależnie od warunków pracy silnika – nawet w przypadku paliwa B30 była wyższa w porównaniu z tą, jaka została zmierzona dla paliwa B7 na początku testów. Zatem zaburzenia w pracy układu CR powodowały większy wzrost emisji PM aniżeli jej obniżenie, będące wynikiem korzystnego wpływu udziału FAME w paliwie.



Rys. 9. Porównanie wielkości masowej, jednostkowej emisji PM dla różnych paliw i warunków pracy silnika: a) 3800 obr./min, 20 Nm, b) 1000 obr./min, 120 Nm

### Wnioski

1. Wzrastający udział FAME w paliwach do silników z ZS nie jest obojętny dla procesów chemicznej degradacji smarowych olejów silnikowych i stabilnego w czasie funkcjonowania układów wtrysku paliwa typu CR.
2. Stosowanie do zasilania silników z ZS paliw z podwyższonym udziałem FAME przyspiesza i pogłębia wielokierunkowe procesy degradacji smarowego oleju silnikowego – w stopniu zagrażającym jego bezpiecznej eksploatacji w zalecanym okresie użytkowania.
3. Ocena stopnia utraty właściwości użytkowych oleju silnikowego wyłącznie w oparciu o właściwości fizykochemiczne jest niewystarczająca, gdyż nie uwzględnia krytycznych warunków jego eksploatacji w cienkiej warstwie – co jest konieczne wobec powszechnych dążeń do zmniejszania tolerancji pasowania współpracujących ze sobą ruchomych elementów silnika.
4. Pełna i wiarygodna, a co za tym idzie wielokierunkowa

ocena złożonych procesów przyspieszonej degradacji oleju silnikowego rozcieńczonego paliwem zawierającym biokomponenty będzie wymagała rozszerzenia zakresu ocenianych właściwości użytkowo-eksploatacyjnych – w oparciu o modyfikacje metod już istniejących lub opracowanie nowych.

5. Wzrost udziału biokomponentów w oleju napędowym powoduje progresywny przyrost zakoksovania wtryskiwaczy układu wtrysku paliwa typu CR, prowadzący do zwiększania wielkości masowej emisji PM. Jest to bezpośrednio związane z ilościowym i jakościowym pogarszaniem procesu rozpylania paliwa, w tym: z zaburzeniami kształtu rozpylanych strug, ograniczaniem ilości wypływającego paliwa, pogarszaniem stopnia rozdrobnienia i rozproszenia kropeł paliwa, zawieszaniem się lub zacieraniem iglic rozpylaczy bądź iglic sterujących przepływem paliwa przez wtryskiwacze itp.

Artykuł nadesłano do Redakcji 12.01.2011 r. Przyjęto do druku 1.02.2011 r.

Recenzent: prof. dr Michał Krasodomski

## Literatura

- [1] Caprotti R., Breakspear A., Graupner O., Klaua T., Kohonen O.: *Diesel Injector Deposits Potential in Future Fueling Systems*. SAE Technical Paper No 2006-01-3359.
- [2] Caprotti R., Breakspear A., Klaua T., Weiland P., Graupner O., Bittner M.: *RME Behaviour in Current and Future Diesel Fuel FIE's*. SAE Technical Paper No 2007-01-3982.
- [3] Chausalkar A., Mathai R., Sehgal A.K., Majumdar S.K., Koganti R.B., Malhotra R.K., Kannan R.K., Prakash C.: *Performance Evaluation of B5 Bio-Diesel – Effect On Euro II Diesel Engine & Engine Lubricant*. SAE Number 2008-28-0122.
- [4] Philip J.G., Dingle, Ming-Chia D. Lai.: *Diesel Common Rail and Advanced Fuel Injection Systems*. SAE International, 2005.
- [5] Simon A.G. Watson, Victor W. Wong: *The Effect of Fuel Dilution with Biodiesel on Lubricant Acidity, Oxidation and Corrosion – a Study with CJ-4 and CI-4 PLUS Lubricants*. Diesel Engine-Efficiency and Emissions Research (DEER) Conference, August 7<sup>th</sup> 2008.
- [6] Stępień Z., Urzędowska W., Roźniatowski K.: *Badanie form zużycia układów wtrysku paliwa w czasie eksploatacji silników z zapłonem samoczynnym*. Dokumentacja INiG nr 0938/TE/08.
- [7] Stępień Z., Urzędowska W.: *Badanie wpływu oleju smarującego silnik o zapłonem samoczynnym na emisję cząstek stałych w spalinach przy zasilaniu silnika paliwem z biokomponentami*. Dokumentacja ITN nr 4085/2007.
- [8] Thornton M.J., Alleman T.L., Luecke J., McCormic R.L.: *Impacts of Biodiesel Fuel Blends Oil Dilution on Light-Duty Diesel Engine Operation*. SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting, June 15–17, 2009 Florence, Italy.
- [9] Urzędowska W., Stępień Z.: *Porównawcze badania degradacji oleju smarowego w silniku wysokoprężnym z bezpośrednim, wysokociśnieniowym wtryskiem paliwa, zasilanym standardowym olejem napędowym lub olejem napędowym zawierającym FAME*. Dokumentacja INiG nr 0085/TE/08.



Dr inż. Zbigniew STĘPIEŃ – kierownik Pracowni Badań Silnikowych i Trybologicznych INiG w Krakowie. Specjalista m.in. w zakresie zjawisk będących wynikiem współdziałania silników z paliwami i olejami smarowymi. Kierownik i uczestnik wielu projektów badawczych. Autor i współautor opracowań, dokumentacji badawczych, projektów oraz patentów.



Mgr inż. Wiesława URZĘDOWSKA – z-ca kierownika Zakładu Oceny Właściwości Eksploatacyjnych INiG w Krakowie. Specjalista w zakresie oceny właściwości użytkowych paliw i środków smarowych. Kierownik i uczestnik licznych projektów badawczych na rzecz przemysłu rafineryjnego. Autor i współautor dokumentacji badawczych, projektów oraz patentów.



Dr inż. Stanisław OLEKSIĄK – absolwent Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej. Adiunkt, kierownik Zakładu Oceny Właściwości Eksploatacyjnych Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Realizuje prace badawcze z zakresu oceny właściwości użytkowych paliw silnikowych i środków smarowych. Autor około 80 publikacji.



Prof. dr Jan CZERWIŃSKI – kierownik Instytutu Silników Spalinowych oraz Stacji Kontroli Gazów Spalinowych, Uniwersytet Nauk Stosowanych, Biel-Bienne, Szwajcaria. Obszar działalności: badania i rozwój silników oraz układów obróbki gazów spalinowych. Autor ponad 150 publikacji.



Dr Otto ANDERSEN – jest naukowcem i kierownikiem projektów badawczych w WNRI (Western Norway Research Institute – Stiftinga Vestlandsforskning) Sogndal, Norwegia. Główny obszar działania to zagadnienia przemysłowej ochrony środowiska, ekologia przemysłu, „zielona” elektronika, analiza cyklu życia (LCA), transport, zużycie energii i energia alternatywna.