

- 1) dr Winicjusz Stanik
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy – Kraków
ul. Lubicz 25A, 31-503 Kraków - Polska
E-mail. stanik@inig.pl tel. 12-6177525
- 2) Prof. dr hab. inż. Janusz Jakóbiec
AGH – Akademia Górniczo – Hutnicza – Kraków
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków - Polska
e-mail. jjakobie@agh.edu.pl tel. 12 6173890
- 3) dr inż. Aleksander Mazanek
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy – Kraków
ul. Lubicz 25A, 31-503 Kraków - Polska
E-mail. mazaneka@inig.pl te. 12-6177533

BADANIA SILNIKOWE DOTYCZĄCE KOKSOWANIA I ZANIECZYSZCZENIA NOWOCZESNYCH WIELOOTWOROWYCH WTRYSKIWACZY WYSOKOCIŚNIENIOWEGO UKŁADU ZASILANIA PALIWEM SILNIKÓW ZS

ENGINE TESTS FOR COKING AND CONTAMINATION OF MODERN MULTI- INJECTION INJECTORS OF HIGH-PRESSURE FUEL SUPPLIES COMPRESSION- IGNITION ENGINE

Streszczenie:

W pracy przedstawiono wyniki badań silnikowych dotyczących zanieczyszczenia i koksowania nowoczesnych wielootworowych wtryskiwaczy wysokociśnieniowego układu zasilania paliwem silników o zapłonie samoczynnym (ZS). W zapobieganiu tym zjawiskom wiodącą rolę odgrywa skuteczność działania dodatków detergentowo-dyspergujących o odpowiednim poziomie dozowania. Przedmiotem badań jest bazowy olej napędowy z udziałem 7%(v/v) FAME.

W celu sprawdzenia skuteczności działania badanych dodatków wykonano testy silnikowe zgodne z procedurą CEC F-98-08 PSA DW-10 pod kątem koksowania i zanieczyszczenia nowoczesnych wielootworowych wtryskiwaczy wysokociśnieniowego układu zasilania silników o ZS oraz sformułowano wnioski.

Słowa kluczowe: silnik, wtryskiwacz, paliwo, dodatek detergentowo-dyspergujący

Summary:

The paper presents the results of engine tests for contamination and coking of modern multi-injection injectors of high-pressure fuel supplies compression-ignition engines. The subject of research is base diesel fuel with 7% (v / v) FAME, and effectiveness of the detergent-dispersant additives plays a key role. The engine tests were performed according to the CEC procedure F-98-08 PSA DW-10, it was essential for the coking and contamination of modern multi-injection injectors of high-pressure fuel supplies compression-ignition engines and for the conclusions.

Keywords: engine, injector, fuel, detergent-dispersant additive

1. Wstęp

Rozwój motoryzacji charakteryzuje się intensywnymi badaniami w zakresie doskonalenia technologii paliw silnikowych, w tym pakietów dodatków uszlachetniających.

Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym (ZS), spełniające wysokie wymagania współczesnych jednostek napędowych wyposażonych w wysokociśnieniowe systemy wtrysku paliwa HPCRS (High Pressure Common Rail System), katalityczne wielofunkcyjne układy

oczyszczania spalin, muszą charakteryzować się odpowiednimi właściwościami fizykochemicznymi i użytkowymi.

Optymalizacja procesu spalania ładunku w silniku o zapłonie samoczynnym przy wieloetapowym wtrysku paliwa węglowodorowego oraz paliwa z udziałem biokomponentów w systemie Common Rail, wyznacza główne kierunki prac badawczych w zakresie technologii i stabilności termooksydacyjnej biopaliw oraz rozwoju konstrukcji silników, w tym układu zasilania paliwem.

Przebieg spalania mieszanki w przestrzeni roboczej silnika decyduje o jego sprawności użytkowej i pozytywnym efekcie ekologicznym – zmniejszeniu emisji szkodliwych związków do atmosfery.

2. Czynniki kształtujące proces zanieczyszczenia wtryskiwaczy wysokociśnieniowego wtrysku paliwa HPCRS

Wprowadzenie na rynek samochodowy nowoczesnych silników o zapłonie samoczynnym wyposażonych w wysokociśnieniowe układy bezpośredniego wtrysku paliwa zwane: High Pressure Common Rail System” (HPCRS) zwiększyło tendencję do koksowania wielootworowych wysokociśnieniowych wtryskiwaczy.

Głównym problemem jest w tym przypadku mała średnica otworków dysz rozpylacza wynosząca poniżej 150 μm jak i wysoką temperaturę końcówki wtryskiwacza usytuowanego w komorze spalania [2]. Konstrukcja wspomnianych układów wtrysku paliwa oraz ekstremalne warunki pracy (wysoka temperatura końcówek wtryskiwaczy przekraczająca 300°C, wysokie ciśnienie wynoszące do 250 MPa dla wtryskiwaczy ze wzmocnieniem hydraulicznym, małe średnice otworków dyszy rozpylaczy paliwa) powodują powstawanie węglowodorowych osadów (koks) tworzących się u wylotu dyszy rozpylaczy [3,5].

Według [1] istotny wpływ na koksowanie końcówek wtryskiwaczy mają następujące czynniki:

- właściwości fizykochemiczne paliwa, skład komponentowy, odporność termo oksydacyjna;
- temperatura końcówki wtryskiwacza oraz odporność na degradację termiczną paliwa;
- konstrukcja końcówki wtryskiwacza, średnica wewnętrzna i kształt geometryczny dyszy oraz zwilżalność wewnętrznych powierzchni wtryskiwacza przez paliwo.

Istotny wpływ na proces koksowania rozpylaczy ma temperatura [18], Lepperhoff wykazał, że temperatury wyższe niż 300°C powodują szybkie odkładanie się koks na końcówkach wtryskiwacza spowodowane jest zjawiskiem krakingu oleju napędowego i kinetyką reakcji termicznej kondensacji produktów krakingu [6]. Aby zapewnić czystość i sprawność układów wtryskowych HPCRS, olej napędowy powinien spełniać nie tylko minimalne wymagania dotyczące jego jakości według normy PN-EN 590: 2013-12, ale również wytyczne producentów układów wtryskowych przedstawionych w postaci deklaracji wspólnego stanowiska z 2012 roku odnośnie wymagań jakościowych oleju napędowego „Fuel Requirements for Diesel Injection System – Diesel Fuel Injection Equipment Manufacturers – Common Position Statment 2012”. Warunkiem koniecznym są również wytyczne Światowej Karty Paliw dla oleju napędowego kategorii 4 – wydanie piąte z września 2013 roku.

Niektóre właściwości paliwa takie jak wysoka lepkość, niska lotność, zawartość olefin, związków aromatycznych, zawartość biokomponentów (FAME) ułatwiają tworzenie się na końcówce wtryskiwaczy nagarów i koksów. Postęp w dziedzinie technologii dodatków uszlachetniających detergentowo – dyspergujących i poziomy ich dozowania pozwalają na rozwiązanie wielu problemów natury konstrukcyjnej samych wtryskiwaczy, jak i wpłynąć pozytywnie na kinetykę reakcji kinetycznych spalania paliwa w silniku o zapłonie samoczynnym.

3. Badania silnikowe w zakresie oceny zanieczyszczenia nowoczesnych wtryskiwaczy wielootworowych

W produkowanych obecnie nowoczesnych silnikach o zapłonie samoczynnym ich skomplikowany system kontroli pracy oraz precyzyjna dawka wtryskiwanego paliwa jest coraz bardziej zależna od obecności osadów w samym paliwie, jak również od osadów powstałych podczas procesu spalania paliwa w silniku [12].

W marcu 2008 roku Europejski Komitet Normalizacyjny (CEC) sformalizował i wdrożył nową procedurę CEC F-98-08 "Direct Injection Common Rail Diesel Engine Nozzle Coking Test" badania silnikowego dotyczącego koksowania i zanieczyszczenia nowoczesnych wtryskiwaczy wielootworowych jako standardowy test do oceny jakości paliw i skuteczności działania dodatków detergentowych.

Wybrano silnik o zapłonie samoczynnym z bezpośrednim wtryskiem Peugeot DW-10 spełniający wymagania normy emisji spalin Euro 4, stosowany powszechnie na rynku europejskim w samochodach osobowych Peugeot 407 2.0 HDi 16V, wyposażony we wtryskiwacze spełniające wymagania norm emisji spalin Euro 5.

Do testów wykorzystano stanowisko silnikowe przeznaczone do prowadzenia testów opartych o procedurę CEC F-98-08 z wykorzystaniem turbodoładowanego czterosuwowego silnika PSA DW-10 o zapłonie samoczynnym z bezpośrednim wtryskiem paliwa. (Rys. 1.)



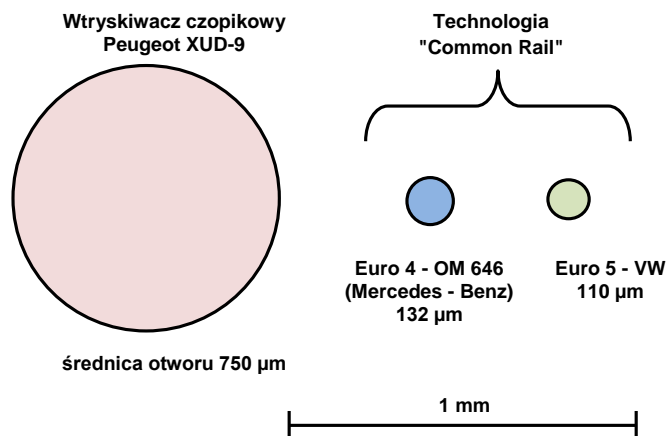
Rys 1. Stanowisko silnikowe PSA DW-10

Fig. 1. PSA DW-10 engine test bed

Badania eksperymentalne w zakresie zanieczyszczeń wtryskiwaczy prowadzono w oparciu o procedurę CEC F-98-08 na silniku PSA DW-10, który charakteryzował się:

- wtryskiem bezpośrednim;
- czterema zaworami na cylinder;
- pojemnością 1998 cm³;
- turbodoładowaniem z recyrkulacją spalin (EGR) i filtrem cząstek stałych;
- mocą znamionową 100 kW przy 4000 obrotów na minutę;
- maksymalnym momentem obrotowy 320 Nm przy 2000 obrotów na minutę;
- wtryskiwaczami typu Siemens VDO, Euro 5;
- układem wtryskowym typu "Common Rail" o ciśnieniu 160 MPa;
- piezoelektrycznie sterowanymi wtryskiwaczami 6-cio otworowymi o średnicy dysz rozpylających 110 μm.

Światowa Karta Paliw (WWFC 2013) wprowadziła do oceny czystości zarówno wtryskiwaczy czopikowych jak i oceny czystości wysokociśnieniowych wtryskiwaczy wielootworowych dla olejów napędowych kategorii 4 i 5 wg Światowej Karty Paliw obok procedury CEC F-23-01 procedurę CEC F-98-08. Na rysunku 2 przedstawiono względne średnice dysz rozpylających wtryskiwaczy służących do oceny skłonności paliw do zanieczyszczania wtryskiwaczy [17].



Rys 2. Względne średnice dysz rozpylających różnych wtryskiwaczy
Fig. 2. Relative diameters of various injectors spray nozzles

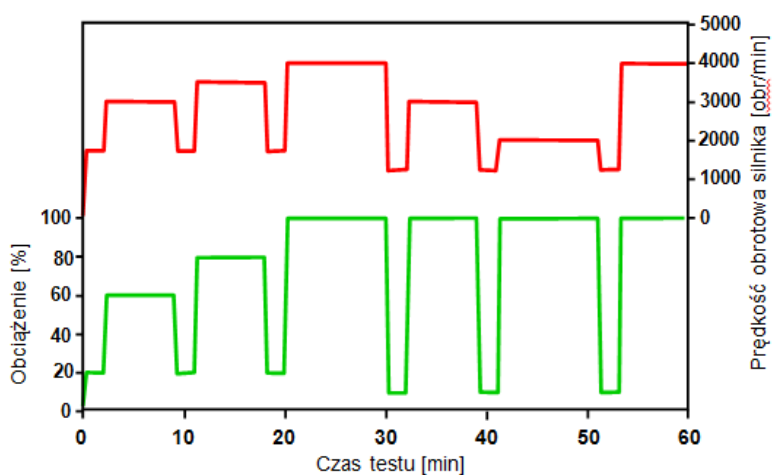
Według Światowej Karty Paliw (WWFC 2013) dla 4 i 5 kategorii olejów napędowych dopuszcza się maksymalnie 2% straty mocy silnika po badaniu według procedury CEC F-98-08. Test silnikowy PSA DW-10 symuluje warunki jazdy drogowej. Badanie silnikowe prowadzone przy określonych prędkościach obrotowych i obciążeniach silnika, w tym 60-cio minutowe cykle składające się z 12 faz. W tabeli 1 podano parametry poszczególnych faz, natomiast na rysunku 3 zamieszczono profil obciążeniowo - obrotowy przebiegu jednego 60-cio minutowego cyklu badawczego.

Tabela 1. Parametry 12-sto fazowego cyklu badawczego testu na silniku PSA DW-10
Table 1. Parameters of 12 phase test cycle on a PSA DW-10 engine

Faza	Czas [min]	Obroty silnika [obr/min] ± 20 obr/min	Obciążenie [%]	Moment obrotowy [Nm] ± 5 Nm
1	2	1750	(20)	62
2	7	3000	(60)	173
3	2	1750	(20)	62
4	7	3000	(80)	212
5	2	1750	(20)	62
6	10	4000	100	*
7	2	1250	(10)	25
8	7	3000	100	*
9	2	1250	(10)	25
10	10	2000	100	*

11	2	1250	(10)	25
12	7	4000	100	*
	$\Sigma = 60$			

Dla każdego wykonywanego testu montuje się nowy zestaw wtryskiwaczy, które są sprawdzane w 16-sto godzinnym teście na paliwie odniesienia (referencyjnym) nie powodującym ich zanieczyszczenia. Sprawdza się obserwowaną moc, wielkość przedmuchu gazów spalinowych do skrzyni korbowej w zależności od momentu obrotowego silnika i zużycia paliwa w porównaniu ze znanymi wartościami. Monitoruje się również zużycie oleju smarowego przed rozpoczęciem i po zakończeniu badań. Procedura badania składa się z naprzemiennych czterech sekwencji 8-mio godzinnej pracy silnika według profilu obciążeniowo - obrotowego przedstawionego na rysunku 3 i trzech sekwencji 4-godzinnej postoju silnika. Całkowity czas testu wynosi zatem $16 + 32 + 12 = 60$ godzin.



Rys 3. Profil obciążeniowo - obrotowy przebiegu 1 cyklu badawczego na silniku PSA DW-10

Fig. 3. Load-rotation profile of one testing cycle on a PSA DW-10 engine

4. Procedura CEC F-98-08 PSA DW-10 badania skuteczności działania dodatków detergentowo – dyspergujących

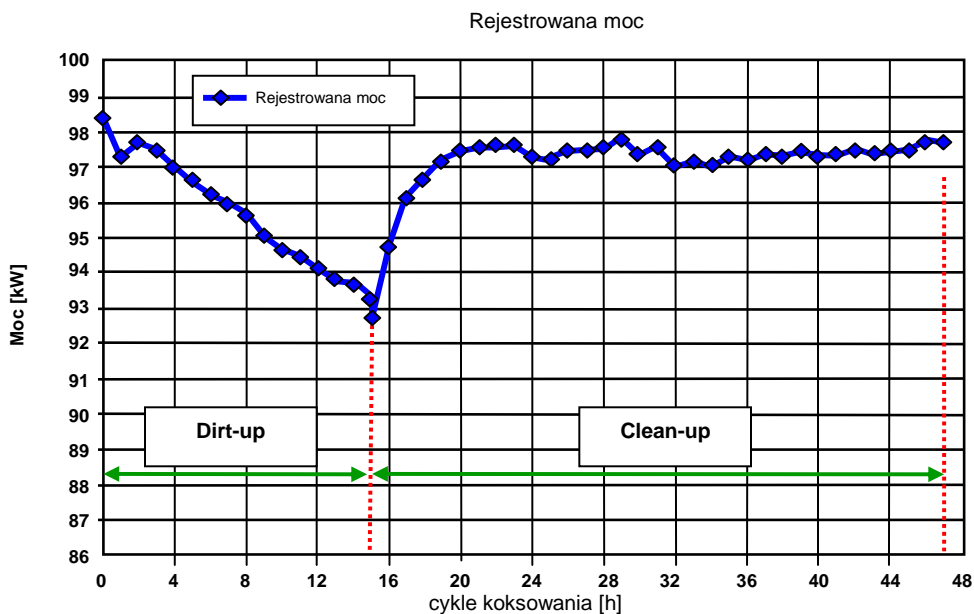
Procedura CEC F-98-08 PSA DW-10 umożliwia również badanie skuteczności działania dodatków detergentowo - dyspergujących w zakresie ich właściwości dotyczące usuwania zanieczyszczenia z wtryskiwaczy po około 16 godzinnym zabrudzeniu w teście "dirt-up". Test silnikowy "dirt-up" prowadzi się przy użyciu referencyjnego oleju napędowego CEC RF 06-03 nie zawierającego FAME stosowanego jako certyfikowane paliwo do badań legislacyjnych silników spełniających wymagania norm emisji spalin Euro 4 Euro 5. Celem przyśpieszenia zanieczyszczenia wtryskiwaczy w procedurze "dirt-up" do paliwa dodaje się 1 mg/kg cynku w postaci neodekalianu cynku. Właściwości paliwa referencyjnego CEC RF 06-03 przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Właściwości paliwa referencyjnego CEC RF 06-03
Table 2. Properties of the reference fuel CEC RF 06-03

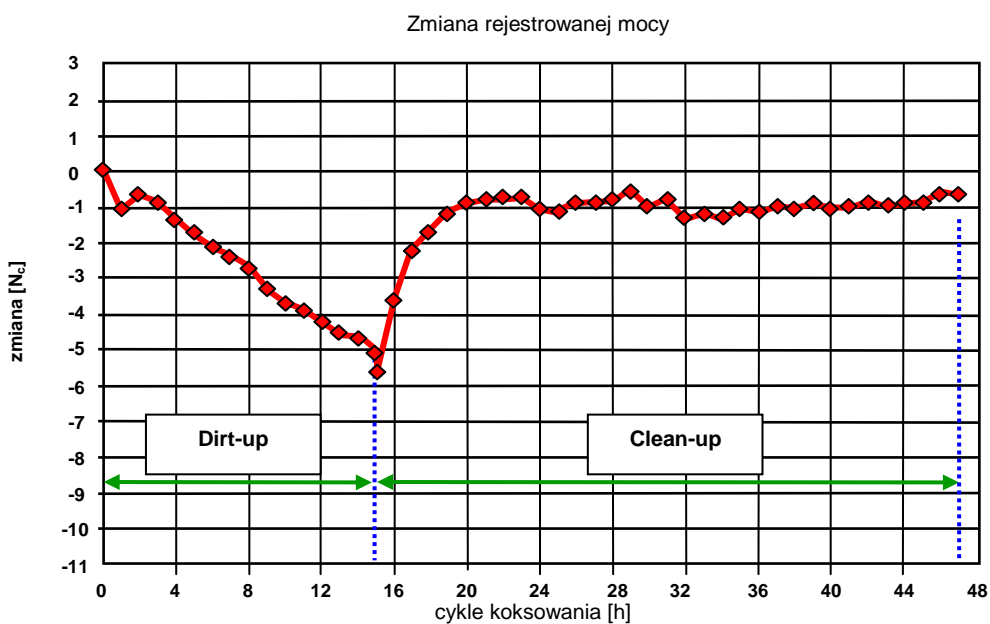
Właściwości	Jednostka	Wyniki badań	
		minimum	maksimum
Liczba cetanowa		52,0	54,0
Gęstość w temperaturze 15°C	kg/m ³	833,0	837,0
Skład frakcyjny: - do 245°C przedestylowało - do 350°C przedestylowało - temperatura końca destylacji	% (V/V) % (V/V) °C	50,0 95,0 -	- - 370
Temperatura zapłonu	°C	55,0	-
Temperatura blokady zimnego filtra	°C	-	-5
Lepkość kinematyczna w temperaturze 40°C	mm ² /s	2,3	3,3
Zawartość siarki	mg/kg	-	10,0
Zawartość policyklicznych węglowodorów aromatycznych	%(m/m)	3,0	6,0
Odporność na utlenianie, całkowite osady nierozpuszczalne	g/m ³	-	25,0
Zawartość estrów metylowych kwasów tłuszczowych (FAME)	%(V/V)	brak	brak
Smarność, skorygowana średnica śladu	µm	-	400
Liczba kwasowa mocnych kwasów	mg KOH/g	-	0,02
Zawartość wody	mg/kg	-	200

Po teście silnikowym obejmującym cykl "dirt-up" wykonuje się 32 godzinny test „clean-up” z użyciem paliwa zawierającego skutecznie działające dodatki detergentowo – dyspergujące z domieszką 1 mg/kg Zn w postaci neodekalanu cynku. Badania silnikowe oleju napędowego "Power Diesel" zawierającego 500 mg/kg Petropaku® i 1200 mg/kg Energocetu® prowadzono według procedury CEC F-98-08 PSA DW-10 "dirt-up" i "clean-up" i wykonano w Laboratorium Silnikowym SGS Drive Technology Center w Austrii.

Rysunek 4 przedstawia przebieg spadku mocy silnika wyrażony w procentach po 16-sto godzinnym cyklu badań "dirt-up", natomiast rys. 5 dotyczy odzyskania mocy po 32 godzinnym cyklu badań "clean-up". Strata mocy po badaniu "clean-up" wyniosła poniżej jednego procenta.



Rys 4. Przebieg zmienności mocy silnika w cyklu badań zanieczyszczających i cyklu badań oczyszczających
 Fig. 4. The course of engine power variability in the 'dirt-up' cycle and in the 'clean-up' cycle



Rys 5. Przebieg zmienności mocy silnika wyrażony w procentach po cyklu badań zanieczyszczających i oczyszczających
 Fig. 5. The course of engine power variability in percent after the 'dirt-up' cycle and 'clean-up' cycle

5. Kompatybilność wielofunkcyjnych dodatków detergentowo – dyspergujących i cetanowo – detergentowych z olejami silnikowymi

Ważnym zagadnieniem wielofunkcyjnych dodatków detergentowo - dyspergujących i cetanowo - detergentowych jest ich kompatybilność z olejami silnikowymi, smarującymi tłoczkowe promieniowe i rzędowe, pompy paliwowe stosowane w samochodach dostawczych i ciężarowych. Badania te wykonuje się w oparciu o procedurę German Society Petroleum and Coal Science and Technology DGMK 531-1 "Test for engine oil compatibility". Polegają one na zmieszaniu oleju silnikowego "Super High Performance Diesel Oil" SHPDO w klasie lepkości SAE 15W/40 z pakietem dodatków do oleju napędowego w stosunku masowym 50:50, przechowywaniu w temperaturze 90°C w czasie 72 godzin, następnie po schłodzeniu próbki do temperatury 20°C w ciągu 1 godziny, ocenie wizualnej powstałych w niej osadów, żeli, zmętnień. Ocenę wizualną w zakresie jednorodności próbki rozszerzono o analizy turbidymetryczne. Próbkę rozcieńczono, uzupełniając do 500 ml olejem napędowym bazowym, wymieszano i oceniono wygląd roztworu. Po upływie 2 godzin roztwór ponownie wymieszano i przefiltrowano przy ciśnieniu 800 hPa, przez filtr o średniej średnicy porów 0,8 mikrona oraz zmierzono czas filtracji 500 ml roztworu. Czas filtracji nie powinien przekraczać 900 sekund, a roztwór końcowy powinien być klarowny i bez osadów. Wyniki badań kompatybilności oleju silnikowego z pakietami dodatków do oleju napędowego Petropak® i Energocet® przedstawiono w tabeli 3.

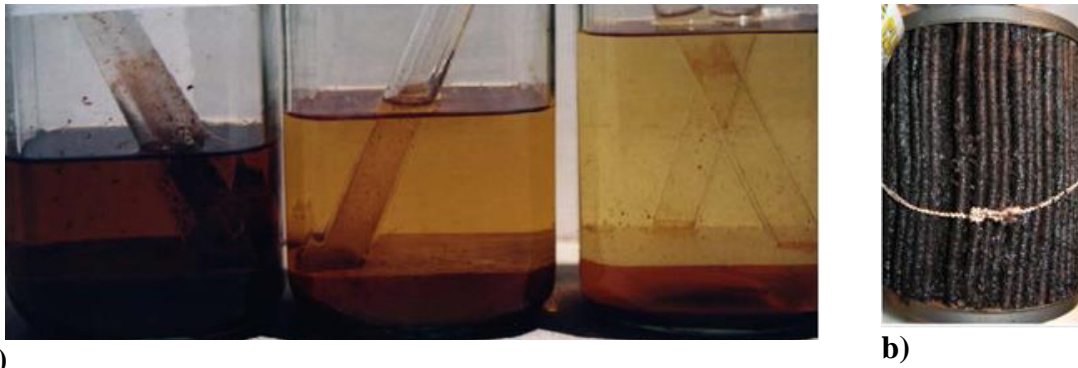
Tabela 3. Wyniki badań kompatybilności pakietów dodatków Petropak® i Energocet® z olejem silnikowym SHPDO SAE 15W/40 według procedury DGMK 531-1

Table 3. Results of tests of packages of Petropak® and Energocet® additives compatibility with the SHPDO SAE 15W/40 engine oil acc. to the DGMK 531-1 procedure

Badany pakiet	Czas filtracji (s)	Wygląd roztworu
Petropak®	106	klarowny bez osadu
Energocet®	187	klarowny bez osadu

Badania eksperymentalne dotyczyły również oceny podatności paliwa na rozwój skażenia mikrobiologicznego. Zastosowanie oleju napędowego o ultraniskiej zawartości siarki (poniżej 10 mg/kg) z zawartością 7 %(V/V) FAME spowodowało wzrost skłonności paliwa na skażenie mikrobiologiczne. Estry metylowe kwasów tłuszczowych jako odnawialny komponent oleju napędowego o właściwościach higroskopijnych łatwo ulegają biodegradacji, stanowiąc znakomitą pożywką dla rozwoju życia mikrobiologicznego. Estry metylowe kwasów tłuszczowych ulegają cztery razy szybciej biologicznej degradacji niż konwencjonalny olej napędowy pochodzenia naftowego. [10] Ponadto w zakresie temperatur 4°C do 35°C estry metylowe kwasów tłuszczowych absorbują 15 do 25 razy więcej wody niż konwencjonalny olej napędowy. Czynniki te sprzyjają rozwojowi życia mikrobiologicznego w czasie magazynowania i dystrybucji takiego paliwa. Skutkiem infekcji mikrobiologicznej paliwa jest zmętnienie, zmiana koloru, wzrost zanieczyszczeń w postaci osadów i szlamów, wzrost lepkości i pogorszenie filtrowalności paliwa.

Na rysunku 6 przedstawiono fotografie zainfekowanego mikrobiologicznie oleju napędowego oraz filtr paliwa zanieczyszczony osadem po degradacji mikrobiologicznej paliwa.



a)
Rys 7. Infekcja mikrobiologiczna oleju napędowego i zanieczyszczony filtr paliwa

- a)** zainfekowany mikrobiologicznie olej napędowy
b) filtr paliwa zanieczyszczony osadem po degradacji mikrobiologicznej paliwa

Fig. 6. Microbiological infection of diesel fuel and a fouled fuel filter

- a)** microbiologically infected diesel fuel
b) fuel filter fouled with a deposit after microbiological degradation of fuel

Dodatki o działaniu biobójczym odgrywają zasadniczą rolę w zapobieganiu i usuwaniu problemów związanych z obecnością mikroorganizmów w oleju napędowym. W prezentowanej publikacji wielofunkcyjny dodatek detergentowo - dyspergujący Petropak[®] zawierał kompatybilne z zastosowanymi poliizobutylenobursztynoimidami biocydy szczegółowo opisane w wynalazkach PL 217137 i PL 218043. [10,11] Ich skuteczność działania biobójczego wykonano w teście prewencyjnym według metody ASTM E-1259:10 "Evaluation of Antimicrobials in Liquid Fuels Boiling Below 390^o", oznaczając zawartość mikroorganizmów w fazie paliwowej metodą IP385 "Determination of viable aerobic microbial content of fuel components boiling below 390^oC". Zastosowana metodyka odzwierciedla czterokrotne przetłoczenie paliwa w łańcuchu dystrybucji ze skażoną fazą wodną przy stosunku fazy paliwowej do fazy wodnej 400 : 1. Badanie trwa cztery tygodnie. Wyniki badań skuteczności działania biocydów w zakresie ochrony mikrobiologicznej w teście prewencyjnym przedstawiono w tabeli 4 [13].

Tabela 4. Wyniki badań skuteczności działania biocydów w zakresie ochrony mikrobiologicznej w teście prewencyjnym wg metody ASTM E-1259:10

Table 4. Results of testing the biocides action effectiveness in the field of microbiological protection in a preventing test acc. to the ASTM E-1259:10 method

Lp.	Czas trwania testu (tygodnie)	Badane paliwo	Materiał badawczy	Zawartość mikroorganizmów w fazie paliwowej (kom/l) i wodnej (kom/ml)		
				bakterie tlenowe	drożdże	grzyby pleśniowe
1	1	Olej napędowy letni gatunek B +7% (V/V) FAME "Premium" (500 mg/kg Petropak [®])	paliwo	< 200	< 200	< 200
			woda	< 200	< 20	< 20
2	2	Olej napędowy letni gatunek B +7% (V/V) FAME "Premium" (500 mg/kg Petropak [®])	paliwo	< 200	< 200	< 200
			woda	< 200	< 20	< 20
3	3	Olej napędowy letni gatunek B +7% (V/V) FAME "Premium" (500 mg/kg Petropak [®])	paliwo	< 200	< 200	< 200
			woda	< 200	< 20	< 20
4	4	Olej napędowy letni gatunek B +7% (V/V) FAME "Premium" (500 mg/kg Petropak [®])	paliwo	< 200	< 200	< 200
			woda	< 200	< 20	< 20

*Ilość poniżej 200 komórek /l w paliwie, uważa się za paliwo pozbawione życia mikrobiologicznego
** Ilość poniżej 200 komórek /ml w wodzie dla bakterii tlenowych i poniżej 20 dla drożdży i grzybów pleśniowych, wodę uważa się za niezainfekowaną mikroorganizmami

Wybrane wyniki badań oceny użytkowej wielofunkcyjnego pakietu detergentowo - dyspergującego i pakietu detergentowo - cetanowego w oleju napędowym "Premium" zawierającym 500 mg/kg Petropaku® i oleju napędowym "Power Diesel" zawierającym 500 mg/kg Petropaku® i 1200 mg/kg Energocetu® przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Wyniki badań wielofunkcyjnego pakietu detergentowo - dyspergującego i pakietu detergentowo - cetanowego w olejach napędowych
Table 5. Results of tests of a multi-function detergent-dispersant package and detergent-cetane package in diesel fuels

Bazowy olej napędowy letni gatunek B +7 %(V/V) FAME	Wymóg	Pakiety	
		Petropak®	Energocet®
Dozowanie mg/kg		500	1200
Smarność wg PN-EN ISO 12156-1, µm	maks. 460	399	427
Kompatybilność wg DGMK 531-1 czas filtracji, s	maks. 300	106	87
Liczba cetanowa	min 51/55	52	59,8
Wskaźnik zmniejszenia drożności rozpylaczy % wg CEC F-23-01	maks. 60	31	-
Wskaźnik zmniejszenia drożności rozpylaczy % wg CEC F-23-01 (500 mg/kg Petropak® + 1200 mg/kg Energocet®)	maks. 30	-	11
Strata mocy po badaniu w teście "dirt-up / clean-up" wg CEC F-98-08, %	maks. 2	-	< 1
Odporność na utlenianie (Rancimat), h	min 40	60,0	56,7
Korozja wg ASTM D665A	max B ⁺⁺	A	-
Pienienie wg NF M07-075 - objętość piany, cm ³ - czas zaniku piany, s	max 100 max 15	30 4,8	- -
Oddziaływanie z wodą wg ASTM D 1095 - zmiana objętości warstwy wodnej - wygląd powierzchni międzyfazowej - stopień rozdziału faz	± 3,0 max 1b max 2	1,0 1b 2	1,0 1b 2
Zawartość mikroorganizmów w fazie paliwowej (kom/l) i wodnej (kom/ml) po czterokrotnym kontaktowaniu paliwa ze skażoną fazą wodną :			
- bakterie tlenowe	paliwo < 200 woda < 200	< 200 < 200	- -
- drożdże	paliwo < 200 woda < 20	< 200 < 20	- -
- grzyby pleśniowe	paliwo < 200 woda < 20	< 200 < 20	- -

6. Podsumowanie

W produkowanych obecnie nowoczesnych silnikach o zapłonie samoczynnym, ich skomplikowany system kontroli pracy, precyzyjna dawka wtryskiwanego paliwa jest coraz bardziej zależna od obecności osadów związanych z przebiegiem wielu następujących reakcji chemicznych paliwa i produktów rozkładu węglowodorów znajdujących się w dyszy wtryskiwacza i na zewnętrznej powierzchni rozpylacza [7].

Widza związana z mechanizmami powstawania osadów we wtryskiwaczach IDID (Internal Diesel Injector Deposits), a także ich składem chemicznym jest wciąż niewystarczająca. Ilość i złożoność czynników inicjujących powstawanie i przyrost wewnętrznych IDID we wtryskiwaczach układów HPCR silników o ZS wciąż wymaga prowadzenia badań ustalających ich znaczenie oraz mechanizmy współdziałania [8,9,15,16].

Wyjaśnienie mechanizmów tworzenia osadów IDID jak również powstawania koksu na dyszach rozpylaczy jest utrudnione ze względu na brak odpowiednich narzędzi badawczych symulujących bardzo trudne warunki panujące wewnątrz komory spalania i wewnątrz wysokociśnieniowych wtryskiwaczy.

Istotnym narzędziem badawczym w tym zakresie są badania silnikowe realizowane według procedur zaproponowanych i uzgodnionych przez producentów układów wtryskowych i silników o ZS przedstawione w Światowej Karcie Paliw (WWFC 2013) według CEC F-98-08 dla silników o zapłonie samoczynnym z bezpośrednim wtryskiem paliwa do komory spalania dla oleju napędowego kategorii 4 wydanie piąte wrzesień 2013 rok [19].

Postępujący rozwój konstrukcyjny i technologiczny tłokowych silników spalinowych oraz stosowanych do nich układów wtrysku paliwa, a także zmieniające się technologie paliw będą wymagały opracowania i stosowania coraz bardziej skutecznych dodatków detergentowo-dyspergujących o wielokierunkowym działaniu.

Wytworzone w symulacyjnych testach silnikowych osady typu IDID spowodowały charakterystyczne, występujące podczas rzeczywistej eksploatacji pojazdów, dysfunkcje wtryskiwaczy układów wtrysku paliwa typu HPCR, często uniemożliwiające ich funkcjonowanie.

Sformułowane wnioski Autorów z badań eksperymentalnych podczas testów silnikowych obejmujących cykl pracy „dirt-up” i „clean-up” dowodzą znaczenia efektywności działania dodatków uszlachetniających i ich kompatybilności, co potwierdzają inni autorzy [4,7,9,14,16,17].

Ważnym elementem oceny użytkowej wielofunkcyjnego dodatku to działanie biobójcze zapobiegające i usuwające mikroorganizmy zanieczyszczające paliwo.

Literatura

1. Birgel A, Ladommatos N, *et al.* "Deposit Formation in the Holes of Diesel Injector Nozzles: A Critical Review," 2008, SAE Paper 2008-01-2383, DOI:10.4271/2008-01-2383 .
2. Caprotti R, Bhatti N, *et al.* "Deposit Control in Modern Diesel Fuel Injection Systems," 2010, SAE Paper 2010-01-2250. <https://doi.org/10.4271/2010-01-2250>.
3. Caprotti R, Breakspear A, " Injector Deposit Test For Modern Diesel Engines", 2005, 5th International Colloquium Fuels TAE Esslingen.
4. Fuel Requirements for Diesel Fuel Injection Systems Diesel Fuel Injection Equipment Manufacturers Common Position Statement 2012.
5. Leedham A, Caprotti R, *et al.* "Impact of Fuel Additives on Diesel Injector Deposits," 2004, SAE Paper 2004-01-2935, DOI: 10.4271/931032
6. Lepperhoff G, and Houben M, "Mechanisms of Deposit Formation in Internal Combustion Engines and Heat Exchangers," 1993, SAE Paper 931032, DOI: 10.4271/2009-01-0848

7. Matzke M, Litzow U, *et al.* "Diesel Lubricity Requirements of Future Fuel Injection Equipment," 2009, SAE Paper 2009-01-0848.
8. Mazanek A.: Ocena parametrów użytkowych wtryskiwaczy piezoelektrycznych na podstawie badań wizualizacyjnych procesu rozpylania paliwa. *Nafta – Gaz*, 2016, 4, 279-284, DOI: 10.18668/NG.2016.04.07
9. Oleksiak S, Łukasik Z, Nowoczesne układy wtrysku paliwa w silnikach Diesla i ich wpływ na jakość paliw i dodatków detergentowo – dyspergujących, *Nafta – Gaz*, 2009, 1, 58-64
10. Patent PL 217137 "Uniwersalny pakiet do bioestrów", 2014, 30.06.2014.
11. Patent PL 218043 "Wielofunkcyjny pakiet dodatków biobójczo-stabilizujących", 2014, 30.09.2014.
12. Sorensen G, Dennis V, *et.al* "Microbial growth studies in biodiesel blends", 2011, *Bioresource Technology* 103, 5259-5264, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.017>
13. Stanik W, Jakóbiec J, Wądrzyk M, Design factors affecting the formation of the air-fuel mixture and the process of combustion in compression ignition engines, 2013, *Combustion Engines* 2013 (R.52, nr.3), 40-50.
14. Stanik W. „Badania poliizobutylenobursztynoimidów w zakresie oceny użytkowej dodatków detergentowo – dyspergujących do paliw silnikowych”, 2015, monografia - Praca Naukowa Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego nr. 206, DOI: 10.18668/PN2015.206
15. Stępień Z.: Przyczyny i skutki tworzenia wewnętrznych osadów we wtryskiwaczach silnikowych układów wysokociśnieniowego wtrysku paliwa. *Nafta – Gaz*, 2013, 3, 256-262
16. Stępień Z. A study of factors influencing the formation of harmful deposits in the diesel engine injectors. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2017; 19 (3): 331–337, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2017.3.3>
17. Velaers A, and de Goede S, "The Properties and Injector Nozzle Fouling Performance of Neat GTL and GTL/EN590 Diesel Blends in Various Diesel Engines," 2012, SAE Paper 2012-01-1692, DOI: 10.4271/2012-01-1692
18. Watkinson A.P., Wilson D.I., " Chemical reaction fouling: A review", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 14, Issue 4, 1997, 315-469, [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(96\)00138-0](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(96)00138-0)
19. *Worldwide Fuel Charter*, Fifth Edition, 2013, September 2013.