

Dariusz Sacha
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Nowe narzędzia badawcze do oceny właściwości użytkowych paliw do silników o zapłonie samoczynnym

Wstęp

Względy ekologiczne, a w szczególności wymóg zmniejszenia zużycia paliw oraz obniżania poziomu toksyczności spalin, spowodowały gwałtowny rozwój silników o zapłonie samoczynnym. Silniki o zapłonie samoczynnym coraz częściej wyposażane są w układy bezpośredniego wtrysku paliwa *common rail*. Układy te posiadają bardzo precyzyjnie wykonane elementy układu paliwowego, w szczególności pompy i wtryskiwacze, w których pod dużym ciśnieniem paliwo podawane jest do komór spalania silnika. Ciśnienie wtrysku paliwa w układach pierwszej generacji kształtuje się na poziomie 1350 barów.

W 2000 roku zmodernizowano układ *common rail*, wprowadzając system wtrysku wielofazowego. Jeden wtrysk może składać się nawet z siedmiu dawek. Ciśnienie wtrysku w układach drugiej generacji zostało podniesione do 1600 barów.

W 2003 roku pojawiły się układy *common rail* trzeciej generacji, w których wtryskiwacze elektromagnetyczne zastąpiono wtryskiwaczami piezoelektrycznymi o znacznie szybszej reakcji. Obecnie trwają prace nad układem wtrysku bezpośredniego czwartej generacji, w którym dalszemu udoskonaleniu poddano system sterowania oraz zwiększono ciśnienie wtrysku.

Precyzyjnie wykonane elementy aparatury wtryskowej są bardzo wrażliwe na jakość stosowanego paliwa. Szczególne znaczenie mają właściwości smarne oraz poziom zanieczyszczeń mechanicznych i obecność wody w paliwie. Paliwo niespełniające wymagań w tym zakresie może w krótkim czasie spowodować uszkodzenia bardzo kosztownej aparatury wtryskowej.

Formulacje obecnie stosowanych paliw do silników o zapłonie samoczynnym ulegają ciągłym zmianom.

Konieczność dostosowania się do proekologicznych regulacji prawnych powoduje gwałtowny rozwój biopaliw na bazie FAME oraz paliw zawierających znaczny procent biokomponentów uzyskanych ze źródeł odnawialnych. Paliwa tego typu mogą stanowić zamiennik dla oleju napędowego pochodzenia mineralnego.

Pomimo występowania dużego podobieństwa między konwencjonalnym olejem napędowym a FAME i ich mieszankami z olejem pochodzenia mineralnego, stosowanie tych samych procedur badawczych w celu oznaczenia parametrów paliwa nie zawsze jest możliwe.

Duży problem stanowi ocena odporności na utlenianie. W szczególności problem ten dotyczy mieszanek paliwowych o różnej zawartości FAME.

Estry wyższych kwasów tłuszczowych dodawane w różnych proporcjach do konwencjonalnych olejów napędowych stosunkowo szybko ulegają procesowi utleniania, tworząc różnego rodzaju osady, żywice, polimery, kwasy i inne zanieczyszczenia. Powstałe produkty utleniania prowadzą do zatykania filtrów, blokowania przepływów, degradacji elementów wykonanych z tworzywa i elastomerów. Dla oceny jakości paliwa w kontekście ww. problemów kluczowe znaczenie ma ocena stabilności oksydacyjnej oraz badanie ilości zanieczyszczeń, zarówno mechanicznych, jak i tych powstałych w trakcie utleniania się paliw.

W artykule omówione zostały dwie nowe metody badawcze pozwalające na analizę i ocenę tych problemów.

Nowy sposób oceny stabilności oksydacyjnej

Od wielu lat badania odporności na utlenianie olejów napędowych i opałowych prowadzi się z wykorzystaniem procedury PN ISO 12205 *Oznaczanie odporności na utlenianie średnich destylatów paliwowych* [5]. Test ten jest przywoływany w normach przedmiotowych dla produktów i służy do oceny stabilności paliw w czasie przechowywania (magazynowania). Określa on proces degradacji oleju, mierzony zawartością związków chemicznych zatrzymanych na filtrze celulozowym lub – w wersji zmodyfikowanej – na filtrze z włókna szklanego. Zastosowanie tej metody dla paliw zawierających nawet do 5% (V/V) FAME, ze względu na zmianę proporcji składników chemicznych, może w skrajnych przypadkach powodować otrzymywanie wyników niejednoznacznych, a nawet błędnych. Na skutek częstego blokowania się sączków w trakcie filtracji, metody tej praktycznie nie można stosować dla oceny stabilności oksydacyjnej biopaliw.

Do oceny paliw estrowych o 100-procentowej (V/V) zawartości FAME powszechnie stosowana jest metoda PN-EN 14112 *Produkty przetwarzania olejów i tłuszczów. Estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME). Oznaczanie stabilności oksydacyjnej (test przyspieszonego utleniania)* [6]. Do oceny mieszanek paliwowych zawierających powyżej 2% (V/V) estrów metylowych kwasów tłuszczowych FAME stosowana jest metoda EN 15751:2008 *Paliwa silnikowe – estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME) jako paliwo lub komponent paliwa do silników Diesla – Oznaczanie stabilności oksydacyjnej w teście przyspieszonego utleniania* [2].

Metoda ta pozwala badać i porównywać stabilność oksydacyjną zarówno paliw estrowych, jak również mieszanek o różnej zawartości estrów wyższych kwasów tłuszczowych. Metoda nie może być jednak stosowana do oceny stabilności oksydacyjnej olejów napędowych pochodzenia naftowego.

Nowym sposobem pozwalającym oceniać stabilność oksydacyjną paliw do silników o zapłonie samoczynnym jest opracowana w kwietniu 2010 roku metoda EN 16091 *Ciekle produkty naftowe – średnie destylaty, estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME) i ich mieszanki – Oznaczenie stabilności oksydacyjnej w teście przyspieszonego utleniania w małej skali* [3].

Badanie przedmiotowych paliw w zakresie oceny stabilności oksydacyjnej zgodnie z metodą EN 16091 wykonuje się na aparacie PETROOXY (fotografia 1).

W opracowywanym obecnie nowym wydaniu normy produktowej dla paliw do silników wysokoprężnych

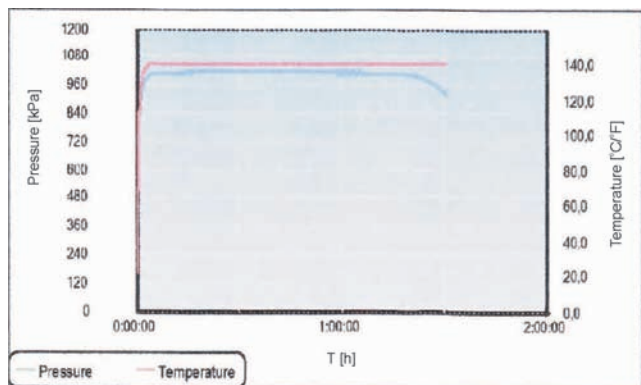


Fot. 1. Aparat do badań stabilności oksydacyjnej zgodnie z normą EN 16091

wprowadzono możliwość badania stabilności oksydacyjnej zgodnie z tą metodą.

Zasada metody badawczej opiera się na pomiarze zmian ciśnienia w szczelnie zamkniętym naczyniu testowym. Do metalowego naczynia testowego pokrytego cienką warstwą złota wprowadza się 5 ml próbki badawczej. Po szczelnym zamknięciu pokrywą, naczynie przepłukuje się tlenem w celu usunięcia powietrza z przestrzeni nad próbką badawczą. Do tak przygotowanego naczynia wprowadza się tlen, by uzyskać ciśnienie 700 kPa (w temperaturze otoczenia). Zbiornik ciśnieniowy wypełniony próbką paliwa i tlenem podgrzewa się do temperatury 140°C, wskutek czego następuje wzrost ciśnienia, spowodowany wzrostem temperatury. W czasie około 2 minut stabilizują się warunki badania, tj. ustala się temperatura i ciśnienie. Okres stabilizacji ciśnienia jest ściśle związany z odpornością badanej próbki na utlenianie. Próbki paliwa o niskiej stabilności oksydacyjnej w krótkim czasie ulegną utlenieniu w całej swojej objętości, powodując znaczny spadek ciśnienia w zamkniętym naczyniu. Czas osiągnięcia stabilnego ciśnienia dla próbek o wysokiej odporności oksydacyjnej będzie znacznie dłuższy. Temperatura i ciśnienie w naczyniu rejestrowane są w odstępach czasu co 1 sekundę do osiągnięcia punktu końcowego, czyli spadku ciśnienia o 10% w stosunku do najwyższej jego wartości. Miarą badania jest czas, jaki upłynął od rozpoczęcia testu, tj. od momentu osiągnięcia przez próbkę temperatury 140°C, do chwili spadku ciśnienia wewnątrz naczynia testowego o 10%.

Charakterystykę przebiegu testu badania stabilności oksydacyjnej paliwa zgodnie z normą EN 16091 przedstawiono na rysunku 1.

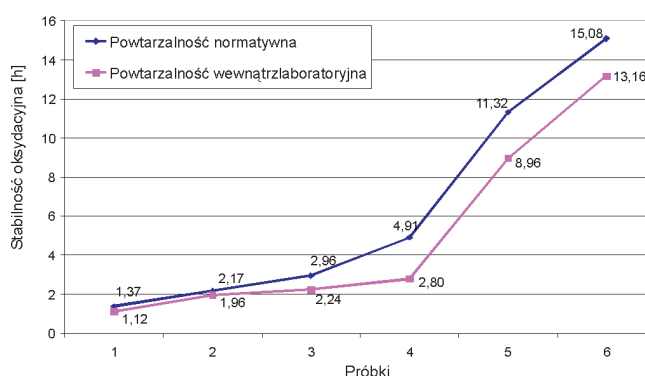


Rys. 1. Wykres przebiegu testu wykonanego zgodnie z normą EN 16091

Metoda EN 16091 *Ciekle produkty naftowe – średnie destylaty, estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME) i ich mieszanki – Oznaczenie stabilności oksydacyjnej w teście przyspieszonego utleniania w małej skali* jest testem szybkim, pozwalającym w krótkim czasie ocenić stabilność oksydacyjną badanych paliw. Do wykonania testu wymagana jest mała ilość paliwa, tj. ok. 5 ml. Test jest bezpieczny, a jego przebieg sterowany mikroprocesorowo. Automatyczny proces sterowania obejmuje grzanie, chłodzenie, jak również przepłukiwanie i napełnianie tlenem. Pomiar spadku ciśnienia rejestruje mikroprocesor wyposażony w bardzo czuły czujnik, a dane za pomocą

interfejsu przesyłane są do komputera, gdzie podlegają obróbce, zaś ostateczny wynik badania stanowi wykres.

Dzięki zastosowaniu automatyzacji procesu przygotowania próbki do badań oraz bardzo precyzyjnie działającym czujnikom, informacje o przebiegu procesu utleniania charakteryzują się wysoką powtarzalnością metody badawczej w porównaniu do obecnie stosowanych metod. Rysunek 2 przedstawia powtarzalność normatywną i wewnątrzlaboratoryjną uzyskaną w INiG. Otrzymany wynik badania w sposób jednoznaczny charakteryzuje odporność przedmiotowej próbki paliwa na utlenianie.



Rys. 2. Powtarzalność wewnątrzlaboratoryjna INiG i normatywna dla metody EN 16091

Ocena wpływu zanieczyszczeń mechanicznych oraz produktów utleniania obecnych w paliwie do silników o zapłonie samoczynnym w układach filtrujących

Stosowanie dokładnych filtrów paliwowych w układach paliwowych silników o zapłonie samoczynnym zapobiega w dość skuteczny sposób procesowi degradacji tych układów. Drobiny zanieczyszczeń mechanicznych oraz różnego rodzaju żele, będące produktami utleniania zwłaszcza biokomponentów, w dużej mierze zatrzymywane są w czasie przepływu paliwa przez filtry, zabezpieczające gładkie powierzchnie elementów pomp i wtryskiwaczy przed uszkodzeniem.

Głównym źródłem zanieczyszczeń paliw są:

- zanieczyszczenia produkcyjne z instalacji rafineryjnych,
- zanieczyszczenia powstałe w wyniku transportu w cysternach i przechowywania w zbiornikach stacji paliw,
- zanieczyszczenia dostające się z zewnątrz w trakcie napełniania układów lub w przypadku ich nieszczelności,
- zanieczyszczenia powstałe w wyniku wzajemnej współpracy elementów układu, tarcia, ciśnienia i temperatury, np. w trakcie przepompowywania paliwa,
- zanieczyszczenia powstałe w wyniku oddziaływania z uszczelnieniami oraz przewodami elastomerowymi,

- zanieczyszczenia powstałe w wyniku procesów utleniania w trakcie przechowywania,
- zanieczyszczenia związane z korozją i destrukcją powierzchni układów,
- zanieczyszczenia wytrącone w wyniku interakcji różnych składników paliwa,
- brak kompatybilności paliwa z materiałem konstrukcyjnym układu paliwowego,
- produkty przemiany materii i obumierania mikroorganizmów.

W okresie eksploatacji pojazdów mechanicznych zanieczyszczenia te osadzają się na filtrach, stopniowo zmniejszając przepływ paliwa do silnika, aż do całkowitego jego zablokowania.

Tendencję paliw do blokowania filtrów mierzy się w celu ustalenia wpływu paliwa na czas użytkowania filtrów w pojazdach mechanicznych. Test ten zaczęto wprowadzać w odpowiedzi na problemy użytkowników pojazdów z blokującymi się filtry paliwa, zwłaszcza w okresie eksploatacji pojazdów napędzanych paliwem

z zawartością FAME. Zaobserwowano, że zwiększająca się zawartość FAME w paliwach do silników o zapłonie samoczynnym w istotny sposób wpływa na ograniczoną efektywność pracy filtrów paliwa (blokowanie).

Wprowadzenie powyższego testu do badań normatywnych paliw silnikowych (PN-EN 590) [7] mogłoby zapewnić dodatkową ochronę konsumentów przed potencjalnymi problemami w trakcie eksploatacji silników wysokoprężnych.

Tendencję paliw do blokowania filtrów paliwa określa umowna wielkość FBT, obliczona na podstawie ilości prze-filtrowanej cieczy oraz zmian ciśnienia w trakcie filtracji. Wartość FBT jest wielkością bezwymiarową, określającą tendencję paliwa do blokowania filtrów paliwowych.

Ze względu na fakt, że filtrowalność paliwa zależy od porowatości materiału filtra, jego struktury oraz rozwinięcia powierzchni, metoda ta jedynie w sposób przybliżony opisuje rzeczywiste oddziaływanie badanego paliwa na różnego rodzaju filtry stosowane w pojazdach mechanicznych.

Szeroko zakrojone badania na świecie w tym zakresie pozwoliły ustalić wielkość FBT, dla której nie istnieje znaczne zagrożenie możliwością zablokowania filtrów paliwa w pojazdach mechanicznych. Zakłada się, że bezpiecznym poziomem jest FBT mniejsze niż 2,0. Większość sprzedawanych obecnie na stacjach paliw olejów napędowych do silników o zapłonie samoczynnym charakteryzuje się wskaźnikiem FBT na poziomie nieprzekraczającym 1,5. Jednak tendencja do zwiększania zawartości FAME w oleju napędowym może w niedługim czasie doprowadzić do gwałtownego pogorszenia się tego wskaźnika, a w konsekwencji do powstania problemów z eksploatacją pojazdów mechanicznych.

Wprowadzenie i stosowanie nowych norm badawczych oraz urządzeń umożliwiających monitorowanie problemu może zapobiec występowaniu tego typu awarii.

Metoda ASTM D 2068-10 [1] oraz równoważna jej norma IP 387/11 *Oznaczanie tendencji do blokowania filtrów* [4] przeznaczone są do badania paliw do silników wysokoprężnych. Mogą być stosowane zarówno do paliw pochodzenia mineralnego (średnich destylatów), jak również do biodiesla i ich mieszanek o różnej zawartości biokomponentów. Jedyne ograniczenie stanowi kompatybilność paliwa z materiałem, z którego wykonany jest filtr.

Aparat do badań tendencji paliw do blokowania filtra paliwa FBT zgodnie z normą ASTM D 2068 przedstawiono na fotografii 2.



Fot. 2. Aparat do badań tendencji paliw do blokowania filtra paliwa FBT zgodnie z normą ASTM D 2068

Zasada metody badawczej polega na pomiarze zmian ciśnienia w układzie pomiarowym oraz pomiarze prze-filtrowanej ilości paliwa (próbki). Pomiar ciśnienia odbywa się przed zestawem filtracyjnym. W trakcie pomiaru mierzona jest również temperatura próbki.

Próbka do badań musi być reprezentatywną dla danej partii paliwa. Pobiera się ją do naczynia przepłukanego trzykrotnie badanym paliwem. Naczynie powinno być wykonane z ciemnego szkła.

Próbkę paliwa przeznaczoną do badania zgodnie z normą ASTM D 2068 przed testem należy odpowiednio przygotować, sprawdzając, czy nie ma w niej wody. Jeśli próbka jest zawodniona, należy odstąpić od badania.

Pojemnik z paliwem trzeba energicznie wytrząsać przez ściśle określony czas, a następnie, przed waniem do pojemnika badawczego, pozostawić nieruchomo na 5 minut. Do naczynia testowego wlewa się 350 ml przygotowanej w ten sposób próbki paliwa. Temperatura próbki paliwa powinna kształtować się w zakresie między 15°C a 20°C, a ciśnienie początkowe w układzie musi wynosić w granicach od 7 kPa do 40 kPa.

W zbiorniku na filtrat należy umieścić układ filtrujący wykonany ze stali nierdzewnej według zamieszczonego schematu (rysunek 3), zwracając uwagę, by nie uszkodzić elementu fil-



Rys. 3. Schemat układu pomiarowego (zestaw filtracyjny)

trującego. Filtry należy przenosić zawsze przy użyciu pincety z płaskimi końcówkami.

Tak przygotowaną próbkę paliwa do badań przetłacza się przez zestaw filtrujący wyposażony w ściśle określony typ filtra (średnica porów zależna jest od wymagań norm przedmiotowych dla badanych produktów) z prędkością 20 ml/min. Najczęściej wykorzystywane są filtry z włókna szklanego o nominalnej średnicy porów 1,6 mikrometra lub filtry poliamidowe w obudowie z polipropylenu o nominalnej średnicy porów 5 mikrometrów.

W czasie badania monitorowana jest ilość przefiltrowanej cieczy oraz zmiany ciśnienia na filtrze. Punkt końcowy pomiaru stanowi osiągnięcie ciśnienia 105 kPa lub przefiltrowanie 300 ml badanej cieczy.

Wielkość zmiany ciśnienia i objętość przefiltrowanej cieczy wykorzystywane są do obliczania wskaźnika FTB, określającego tendencję do blokowania filtrów.

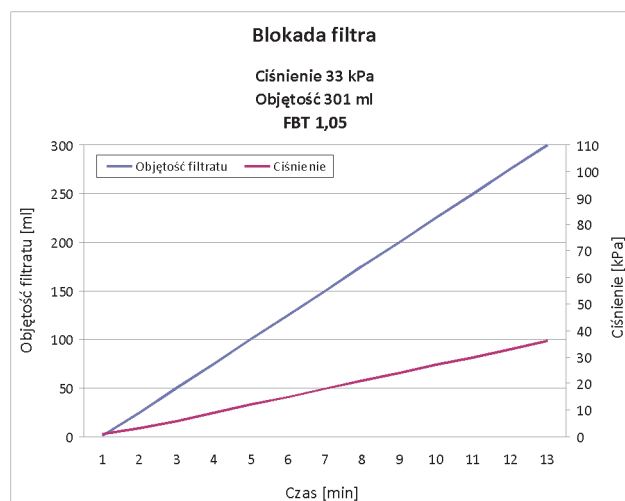
Na rysunku 4 przedstawiono wykres przebiegu testu wykonanego zgodnie z normą ASTM D 2068 dla paliwa handlowego.

Po zakończonym teście należy zdemontować filtr i sprawdzić osad na sączku. Osad powinien znajdować się w centrum i mieć średnicę od 9 mm do 10 mm. Jeśli warunek ten nie został spełniony, test należy powtórzyć.

Na podstawie uzyskanych wyników, stosując wzory (1) i (2), oblicza się wskaźnik FBT. Wzór (1) stosuje się dla przypadku, gdy cała próbka została przefiltrowana. Wzór (2) stosuje się dla przypadku blokady filtra paliwa.

Wnioski

Wprowadzenie i stosowanie nowych norm badawczych oraz urządzeń umożliwiających monitorowanie jakości paliw poprzez ocenę ich odporności na utlenianie i skłonności do blokowania filtrów paliwa może zapobiec części występujących awarii wysokoprężnych układów



Rys. 4. Wykres przebiegu testu wykonanego zgodnie z normą ASTM D 2068

$$FBT = \sqrt{1 + \left(\frac{P}{105}\right)^2} \quad (1)$$

$$FBT = \sqrt{1 + \left(\frac{300}{v}\right)^2} \quad (2)$$

gdzie:

- P – maksymalna wartość ciśnienia uzyskana w czasie filtracji 300 ml paliwa [kPa],
- v – objętość paliwa (w mililitrach) przefiltrowana do czasu wzrostu ciśnienia do wartości 105 kPa.

Literatura

- [1] ASTM D 2068-10 *Standard Test Method for Determining Filter Blocking Tendency*.
- [2] EN 15751:2008 *Paliwa silnikowe – estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME) jako paliwo lub komponent paliwa do silników Diesla – Oznaczenie stabilności oksydacyjnej w teście przyspieszonego utleniania*.
- [3] EN 16091 *Ciekłe produkty naftowe – średnie destylaty, estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME) i ich mieszanki – Oznaczenie stabilności oksydacyjnej w teście przyspieszonego utleniania w małej skali*.
- [4] IP 387/11 *Determination of the Filter Blocking Tendency of Distillate Fuels*.
- [5] PN ISO 12205 *Oznaczenie odporności na utlenianie średnich destylatów paliwowych*.
- [6] PN-EN 14112 *Produkty przetwarzania olejów i tłuszczów. Estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME). Oznaczenie stabilności oksydacyjnej (test przyspieszonego utleniania)*.
- [7] PN-EN 590 *Paliwa do pojazdów samochodowych – Oleje napędowe – Wymagania i metody badań*.



Mgr inż. Dariusz SACHA – starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Oceny Właściwości Eksploatacyjnych Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Prowadzi badania w zakresie oceny stabilności oksydacyjnej i odporności korozyjnej produktów naftowych oraz kompatybilności produktów naftowych z elastomerami.