

Grzegorz BORUTA
Arkadiusz OLEJNIK
Andrzej PIĘTAK
Mieczysław STRUŚ

PTNSS–2015–3483

Testing the intensity of the carbon deposits accumulation on fuel injector nozzles for different bio-fuels

The conditions the use of bio-fuels and bio-components for oil fuels were described. The test stand and the experiment designed to investigate the difference in the intensity of the carbon deposits accumulation within fuel injector nozzle holes feed into the cylinder of diesel engine standard diesel and six different compositions of bio-fuels were describes. During this experiment, variations of pressure of air expanding from the stand cylinder to the atmosphere through holes of nozzles used injectors were recorded. The similarity of acquired pressure variations was rated. Based on the curvilinear regression exponent function, the intensity of accumulation of carbon deposits on the nozzles, depending on the used fuel, was also evaluated. It was found that the accumulation for one of the tested bio-fuels is particularly intense and larger than the one of diesel fuel and may be result of high carbon content relative to hydrogen and oxygen content in its molecules.

Key words: bio-fuels for diesels, carbon deposits, engine dynamometer tests

Badania intensywności gromadzenia się osadów na rozpylaczach dla różnych biopaliw

Opisano uwarunkowania stosowania biopaliw oraz biokomponentów do paliw ropopochodnych. Opisano stanowisko badawcze i eksperyment mający na celu zbadanie różnicy intensywności gromadzenia się osadów w obrębie otworów rozpylacza wtryskiwacza podającego do cylindra silnika o zapłonie samoczynnym standardowy olej napędowy oraz sześć różnych kompozycji biopaliw. W trakcie tego eksperymentu rejestrowano czasowe przebiegi ciśnień powietrza rozprężającego się z butli do atmosfery przez otwory rozpylaczy użytych wtryskiwaczy. Oceniono podobieństwo zarejestrowanych przebiegów ciśnień. W oparciu o regresję krzywoliniową funkcją eksponens oceniono również intensywność gromadzenia się osadów na rozpylaczach zależnie od zastosowanego paliwa. Stwierdzono, że gromadzenie to dla jednego z badanych biopaliw jest szczególnie intensywne i większe niż dla oleju napędowego i może wynikać z dużej zawartości węgla w stosunku do wodoru i tlenu w jego cząsteczkach.

Słowa kluczowe: biopaliwa dla silników o ZS, osady (nagary), badania hamowniane

1. Wprowadzenie

Od wielu lat wiele ośrodków naukowych prowadzi prace nad opracowaniem paliw do silników spalinowych, też napędzających samochody, alternatywnych do powszechnie dziś stosowanych ciekłych paliw ropopochodnych, czyli benzyn i olejów napędowych. Wynika to z wielu przyczyn, z których najważniejszymi wydają się: ograniczenie emisji toksycznych związków chemicznych, poszukiwania źródeł paliw w sytuacji prognozowanego wyczerpywania się złóż ropy naftowej, chęć stworzenia pewnego obiegu zamkniętego pierwiastków w środowisku, spowalniającego efekt kumulacji w nim gazów cieplarnianych (np. dwutlenek węgla jako produkt spalania paliw jest jednocześnie związkiem potrzebnym roślinom do wzrostu, rośliny są surowcem do produkcji paliw itd.), próby uniezależnienia się od państw dostawców ropy naftowej, obniżenie czy tylko zahamowanie wzrostu kosztów paliw przy jeszcze do niedawna ciągle rosnącej cenie ropy naftowej, i wreszcie optymalizacja

składu paliw w aspekcie zwiększenia trwałości i zmniejszenia kosztów eksploatacji paliw i silników przez nie zasilanych. W efekcie tych prac zauważa się rosnący udział w rynku paliw kopalnych paliw gazowych (niestety tak jak ropa naftowa pozyskiwanych ze złóż), ale także paliw gazowych otrzymywanych na drodze przetwórstwa chemicznego (tzw. biogazów o zróżnicowanej zawartości metanu) oraz paliw ciekłych otrzymywanych na drodze fermentacji roślin lub estryfikacji olejów roślinnych. Obecnie większość zastosowań komercyjnych alkoholi (metanolu i etanolu) oraz metylowych i etylowych estrów kwasów tłuszczowych ogranicza się jeszcze tylko do domieszki nimi rafinatów ropy naftowej, ale na wielu lokalnych rynkach paliw udział tych tzw. biokomponentów jest już znaczący, tzn. nie na poziomie kilku, ale nawet kilkudziesięciu procent. I dotyczy to paliw do silników zarówno o zapłonie iskrowym, jak i samoczynnym. Wydaje się, że najpoważniejszą przyczyną oporów przed powszechnym korzystaniem z biopaliw jest krótkowzroczna chęć za-

chowania status quo przez zarządy naftowych koncernów paliwowych (w świecie demokratycznym i wolnorynkowym) oraz rządy państw autorytarnych dysponujących złożami ropy naftowej i gazu ziemnego. Pewną nadzieją na upowszechnienie biopaliw są niektóre działania rządów państw o wysokiej świadomości ekologicznej, np. wymóg stosowania biokomponentów w paliwach dla transportu naziemnego w Europie zawarty w dyrektywie unijnej 2003/30/EC.

Zastosowanie mieszanek zawierających niewielkie ilości estrów i alkoholi, np. o zawartości etanolu do ok. 15% praktycznie nie wymaga regulacji silników, bo spadek mocy jest nieodczuwalny przez kierowców i wynosi ok. 1÷5%, co jest praktyczną dokładnością rozrzutu regulacji mocy silników przez ich wytwórców. Z uwagi na różnice wartości opałowej oleju napędowego (43 MJ/kg), estrów (39 MJ/kg) i etanolu (27 MJ/kg), oczywiście wzrasta nieco zużycie paliwa z biokomponentami, ale paliwa tańszego i bardziej „ekologicznego”. Przy większych zawartościach etanolu, w celu zachowania tej samej mocy silnika, wymagane jest przeregulowanie aparatury paliwowej odpowiednio zwiększające wydatek paliwa. Jednak niższa cena paliwa o dużej zawartości etanolu i tak zmniejsza koszty eksploatacji samochodów. Większa „ekologiczność” paliw zawierających alkohole i estry wynika w najprostszym chemicznym ujęciu z tego, że w ich cząsteczkach obecny jest tlen (przy takim samym zasilaniu silnika w powietrze poprawia się skuteczność spalania paliwa do dwutlenku węgla i wody, a więc zmniejsza się o ok. 25÷30% zawartość w spalinach tlenu węgla, węglowodorów i cząstek stałych, nawet w niższej temperaturze, co z kolei o ok. 10% obniża zawartość w spalinach tlenków azotu) i nie ma siarki (mniejsza jest emisja jej tlenków i mniejsza jest korozyjność samego paliwa).

Nie stwierdza się też zwiększonych problemów eksploatacyjnych w związku z różnymi, jednak nie diametralnie, temperaturami zapłonu tych paliw (tzn. etanolu, estrów, oleju napędowego i benzyny) – warunki bezpieczeństwa przy przechowywaniu paliwa i napełnianiu nim zbiorników oraz przy użytkowaniu i obsłudze silników zasilanych takimi paliwami są zbliżone. Podobnie problemem nie jest wchłanianie wody przez paliwa z biokomponentami (głównie dotyczy to higroskopijnych alkoholi). Również rozruch silników zasilanych takimi paliwami nie różni się istotnie od rozruchu silników zasilanych paliwami klasycznymi.

Niestety stosowanie alkoholi i estrów do zasilania silników ma też pewne wady. Jedną z nich jest nieco większa agresywność na niektóre gumy i elastomery w porównaniu z benzyną i olejem napędowym, jednak ma to znaczenie tylko dla silników starych, nieprzystosowanych do zasilania biopaliwami. Jednak i dla nich prawidłowo prowadzone okresowe obsługiwania techniczne i obserwacja

stanu połączeń pozwalają utrzymać odpowiednio wysoki poziom gotowości technicznej. Obecnie większość producentów silników stosuje do ich produkcji materiały odporne na działanie alkoholi i estrów. Kolejne potencjalne niebezpieczeństwo może wynikać z wiania paliwa z estrami i alkoholami do układu zasilania w paliwo silnika zasilanego wcześniej przez długi czas np. czystym olejem napędowym, bo nowe paliwo może wypłukiwać stare osady ze zbiornika, pomp i przewodów. Jednak zwykle przy przejściu na zasilanie paliwem z biokomponentami silnika takiego starego pojazdu wystarczy przepłukać jego stary zbiornik oraz skrócić okres między wymianami filtra paliwa.

Najpoważniejszą jednak wadą stosowania estrów kwasów tłuszczowych jako dodatków do oleju napędowego podawanego przez wysokociśnieniowe układy zasobnikowe jest poprodukcyjna obecność w nich sodu (metal będnącego katalizatorem w procesie estryfikacji) oraz pozostałości kwasów tłuszczowych. Tworzą one bowiem sodowe mydła kwasów tłuszczowych, słabo rozpuszczalne w oleju napędowym, łatwo się z niego wytrącające i przywierające do stykających się z nim powierzchni, też elementów roboczych podzespołów układu wtrysku paliwa, w postaci osadów o jasnej białoszarej barwie. Istnieje też możliwość powstawania osadów z produktów utleniania komponentów paliw, zwłaszcza niestabilnych metylowych estrów kwasów tłuszczowych. Osady te mogą dość szybko doprowadzić do nieprawidłowego działania, a nawet całkowitego zablokowania wtryskiwaczy z wysokociśnieniowych układów zasobnikowych (luz pomiędzy obudową rozpylacza i poruszającą się w nim iglicą wynosi w nich zaledwie ok. 1 µm): spowalniają szybkość działania wtryskiwaczy poprzez sklejanie współpracujących ze sobą elementów roboczych wtryskiwaczy, co prowadzi do utraty kontroli nad odmierzeniem dawki paliwa i jej podziałem podczas wtrysku wieloczęściowego. W praktyce powoduje to utrudniony rozruch silnika, wypadanie zapłonów, nierównomierną pracę silnika niezależnie od jego obciążenia, niekontrolowane zmiany mocy i momentu obrotowego silnika, wzrost zadymienia i emisji szkodliwych składników spalin i dwutlenku węgla, wzrost zużycia paliwa. Uwagi te dotyczą nie tylko energetycznych (tj. służących tylko za paliwo) dodatków do bazowego oleju napędowego, ale też dodatków „uszlachetniających”: kwasowych dodatków smarowniczych, inhibitorów korozji czy dodatków detergentowych. [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]

Opisane w pracy badania miały przyczynić się do poszerzenia wiedzy o biopaliwach i paliwach z biokomponentami w aspekcie osadzania przez nie osadów w komorze spalania silnika o zapłonie samoczynnym z wtryskiem bezpośrednim. Twierdzi się, że dla takich silników właśnie paliwo odgrywa kluczową rolę w gromadzeniu się osadów na rozpylaczach [1, 2, 3, 7]. Skupiono się na groma-

dzeniu się osadów w obrębie otworów rozpylacza wtryskiwacza podającego paliwo do silnika, gdyż zmieniony kształt i zmniejszone rozmiary tych otworów przez zgromadzone osady, powodują zmianę kształtu strugi wtryskiwanego paliwa, a więc zmianę jakości rozpylenia paliwa i w konsekwencji zmianę przebiegu procesu spalania, uzyskanego momentu obrotowego i składu spalin. Jakość rozpylenia paliwa ma szczególne znaczenie we współczesnych zasobnikowych układach zasilania silników o zapłonie samoczynnym ze względu na wysublimowanie ich pracy, przynajmniej w zamyśle ich konstruktorów – ciśnienie wtrysku paliwa sięga ok. 200 MPa, ilość odmierzanego, a następnie wtryskiwanego przez otwórki o średnicy silnika o pojemności skokowej ok. 2 litrów (samochodu osobowego), zawiera się w zakresie od 1 (dawka pilotująca) do 40 mm³, czas wtrysku dawki paliwa to 1÷2 ms, co w odniesieniu do strategii wtrysku wieloczęściowego oznacza wykonanie do 10000 wtrysków na minutę. Najszybsze stosowane obecnie wtryskiwacze elektromagnetyczne uzyskują czas otwarcia rzędu 0,3 ms, a coraz szerzej wykorzystywane wtryskiwacze piezoelektryczne – do 0,1 ms. Możliwość gromadzenia się osadów w obrębie otworów rozpylaczy (a także wewnątrz wtryskiwaczy) może radykalnie zmniejszyć, a nawet wyeliminować, możliwość tak dokładnego sterowania procesem wtrysku.

2. Zakres badań paliw w trakcie eksperymentu

W Laboratorium Badania Jakości Biopaliw i Hamowni Silnikowej Katedry Mechatroniki i Edukacji Techniczno-Informatycznej Wydziału Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego przeprowadzono badania nad różnicą intensywności gromadzenia się osadów w obrębie otworów rozpylacza wtryskiwacza podającego do cylindra silnika o ZS standardowy olej napędowy (ON), zakupiony na lokalnej ogólnodostępnej stacji paliw, oraz pięć kompozycji biopaliw o nieznanym dla Laboratorium składzie, oznaczonych przez ich producenta i zlecniodawcę badań jako B1, B2, B3, B4 i B5. Wiedzano, że badane ciecze były potencjalnymi paliwami (nie mogły zniszczyć silnika i aparatury badawczej) i że zawierały estry metylowe i etylowe wyższych kwasów tłuszczowych, jednak nie znano ich dokładnego składu i pochodzenia oraz technologii ich produkcji.

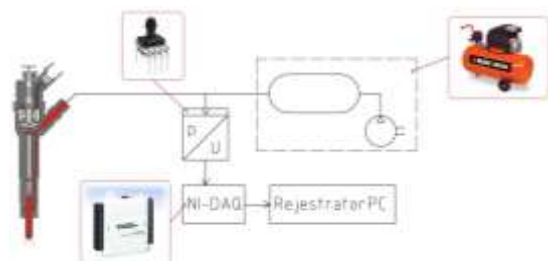
W trakcie badań wykonano szereg czynności mających między innymi określić własności fizykochemiczne badanych biopaliw w porównaniu do oleju napędowego oraz szereg badań hamownianych mających określić charakterystyki pracy silnika zasilanego tymi paliwami. Organoleptycznie określono ich kolor, konsystencję, obecność widocznych osadów i zanieczyszczeń oraz zapach.

Zgodnie z określonymi normami wykorzystując do tego odpowiednią aparaturę określono ich stabilność oksydacyjną (normę spełniało tylko paliwo B5, a paliwa B2 i B4 miały bardzo krótki czas utleniania rzędu 40 min), temperaturę blokowania zimnego filtra (norm nie spełniały paliwa B1 i B3, normę tylko dla lata spełniały paliwa B2 i B4, normę dla okresów przejściowych (wiosna, jesień) spełniało paliwo B5) oraz pozostałość po koksowaniu (normę spełniało tylko paliwo B5, a paliwo B1 miało pozostałość na poziomie prawie aż 2,6%). W trakcie badań hamownianych wyznaczono m. in. charakterystyki momentu obrotowego i mocy silnika (podobne dla wszystkich badanych paliw, różnice nie przekraczały 2%) oraz emisję węglowodorów (dla wszystkich biopaliw, zwłaszcza B2, B4 i B5, wyższą niż dla ON), tlenków azotu (dla biopaliw B2 i B4 niższą, a dla pozostałych wyższą niż dla ON), dwutlenku węgla (dla biopaliwa B5 porównywalną, a dla pozostałych znacznie niższą niż dla ON), tlenku węgla (znacznie wyższą dla wszystkich biopaliw w porównaniu do ON) i pozostałości tlenu (dla biopaliwa B5 porównywalną, a dla pozostałych znacznie wyższą niż dla ON) w spalinach oraz zadymienie spalin (dla paliwa B5 większe niż dla ON, a dla pozostałych biopaliw znikomo małe). Szerzej wyniki tych badań opisano w innych pracach zespołu KMiETI. Tu tylko można zaznaczyć, że tylko biopaliwo B5 miało badane własności zbliżone, choć nie tak dobre, jak olej napędowy.

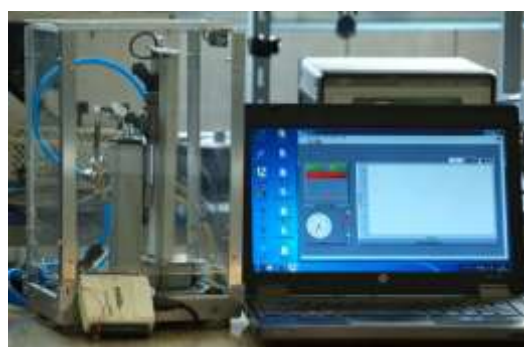
Założenia i przebieg eksperymentu będącego tematem niniejszego opracowania były następujące. Zamierzono sprawdzić zdolność badanych biopaliw do gromadzenia się osadów w obrębie otworów rozpylacza prowadzącego do zatykania tych otworów. Założono, że od ich rozmiarów poprzecznych do kierunku przepływu przez nie pewnego płynu zależą ich opory przepływu wg zależności, że im więcej zgromadzonego osadu, tym mniejsze rozmiary otworów, większe opory przepływu i tym trudniejszy przepływ przez nie owego płynu. W przypadku połączenia rozpylacza ze zbiornikiem płynu, w którym jest on np. sprężony do ciśnienia wyraźnie większego od atmosferycznego, płyn ten będzie wypływał przez otwory rozpylacza jako nieszczelności. Im nieszczelność ta będzie mniejsza (otwory będą mniejsze), tym intensywność wypływu płynu też będzie mniejsza i wolniejszy będzie spadek ciśnienia płynu w zbiorniku. Oczywiście płynem najłatwiejszym do wykorzystania jest powietrze – jest bezpieczne (można go czerpać i wypuszczać z i do otoczenia), bardzo łatwo go sprężyć zwykłą sprężarką i mierzyć jego ciśnienie. W efekcie takiego założonego związku tempa spadku ciśnienia powietrza rozprężającego się z butli do atmosfery przez otwory rozpylaczy z ilością osadu zgromadzonego w obrębie tych otworów, stanowisko badawcze składało się ze sprężarki tłokowej Black&Decker CP5050-142 ze zbiornikiem o po-

jemności 50 dm³, przewodów ciśnieniowych, klatki bezpieczeństwa ze statywem utrzymującym kadłub wtryskiwacza z zainstalowanym badanym rozpylaczem, przetwornika ciśnienia SSCDANN010BG AA5, karty pomiarowej National Instruments NI USB-6008 oraz komputera przenośnego HP6360b z zainstalowaną autorską aplikacją pomiarową, opartą o środowisko LabVIEW. Schemat i widok tego stanowiska pokazano na rys. 1 i 2.

Przed każdą z rejestracji zmian ciśnienia powietrza rozprężającego się z butli do atmosfery przez otwory rozpylaczy, z badanych wtryskiwaczy wymontowano iglice i zawory sterujące, pozostawiając rozpylacz połączony z kadłubem, a więc element, w którym możliwy był swobodny przepływ powietrza od przyłącza wtryskiwacza do otworków rozpylacza. Przyłączy tak przygotowanego wtryskiwacza łączono przez zawór ze sztywnym przewodem i butlą zawierającą powietrze sprężone do nadciśnienia ponad ciśnienie atmosferyczne przekraczającego 0,4 MPa, a wylot rozpylacza był otwarty do atmosfery. W trakcie próby otwierano zawór na przyłączy wtryskiwacza i rejestrowano automatycznie co 1 min malejące ciśnienie powietrza we wspomnianej butli, licząc od chwili zmniejszenia tego ciśnienia do wartości ok. 0,4 MPa powyżej atmosferycznego, dla której przyjęto czas pierwszego pomiaru za 1 (czas przed tą wartością był potrzebny na wydmuchanie resztek paliwa z rozpylacza). Próbę kończono, gdy wartość mierzonego ciśnienia powyżej atmosferycznego była mniejsza



Rys. 1. Schemat stanowiska do pomiaru spadku ciśnienia sprężonego powietrza ulatującego przez badany rozpylacz.



Rys. 2. Widok stanowiska do pomiaru spadku ciśnienia sprężonego powietrza ulatującego przez badany rozpylacz.

niż 0,07 MPa. Po tym badaniu rozpylaczy, wtryskiwacze, których były częścią, złożono z powrotem w funkcjonalną całość. Następnie wtryskiwacze te montowano na silniku i podawano przez nie różne paliwa w trakcie pracy silnika z różnymi prędkościami i pod różnymi obciążeniami układającymi się w przyjęty test trwający ok. 8 h (tab. 1). W kolejno powtarzanych testach silnik zasilano kolejno standardowym olejem napędowym i pięcioma różnymi badanymi mieszaninami biopaliw,

Tab. 1. Sekwencja pracy silnika podczas badań.

Czas trwania [min]	Prędkość obrotowa [obr/min]	Obciążenie zewnętrzne [N·m]
5	bieg jałowy	
25	1500	50
30	1500	100
~5	test zadymienia spalin ¹	
~30	13-fazowy europejski test stacyjny ²	
15	bieg jałowy	
30	2000	150
30	2000	50
20	bieg jałowy	
30	2000	150
30	2000	50
20	bieg jałowy	
30	1500	100
30	2500	50
30	bieg jałowy	
30	2000	150
30	1200	50
30	1500	100
30	bieg jałowy	

¹ przynajmniej trzykrotny cykl: kilkusekundowa jałowa praca silnika, swobodne (bez obciążenia zewnętrznego, jedynie własnym momentem bezwładności i oporami ruchu) przyspieszanie pracy silnika od prędkości biegu jałowego do maksymalnej regulowanej, utrzymywanie przez 1,5 s prędkości maksymalnej regulowanej, swobodne hamowanie pracy silnika od prędkości maksymalnej regulowanej do prędkości biegu jałowego; przynajmniej trzykrotny bo do przypadku uzyskania serii trzech niemalejących wartości maksymalnego zadymienia spalin w każdym cyklu

² sekwencja 4-minutowej pracy silnika na biegu jałowym oraz 2-minutowych prac dla 12 kombinacji prędkości obrotowej (3 wartości równomiernie dzielące zakres prędkości ograniczony od dołu przez prędkość odpowiadającą 50% mocy maksymalnej poniżej prędkości mocy maksymalnej i od góry przez prędkość odpowiadającą 30% mocy maksymalnej powyżej prędkości mocy maksymalnej) i obciążenia zewnętrznego (4 wartości zewnętrznego momentu obciążającego o wartościach 25, 50, 75 i 100% momentu osiąganego dla wybranych prędkości obrotowych)

przy czym w każdym teście (dla każdego z badanych paliw) stosowany był inny egzemplarz wtryskiwacza z puli wtryskiwaczy z badanymi rozpylaczami. W efekcie dysponowano sześcioma wtryskiwaczami, na których rozpylaczach, odpowiednio dla badanych sześciu paliw zasilających tak samo pracujący silnik, zgromadziły się osady odpowiednio zmniejszając rozmiary ich otworów. Z wtryskiwaczy tych ponownie wymontowano iglice i zawory sterujące i ponownie sprawdzono ich opory przepływu (rozmiary otworów rozpylaczy) na stanowisku opisanym powyżej. Otrzymane zmiany rejestrowanego ciśnienia w funkcji czasu dla każdego z rozpylaczy porównano pod kątem różnic ilości osadów zgromadzonych w obrębie otworów rozpylacza wtryskiwacza podającego do cylindra silnika standardowy olej napędowy i badane kompozycje biopaliw.

Do badań gromadzenia się osadów na rozpylaczach wykorzystano partię fabrycznie nowych wtryskiwaczy typu 2.73.12811 z rozpylaczami Bosch DLLA 151 P 1682, dla których spodziewano się powtarzalności wykonania, a więc tych samych rozmiarów otworów rozpylaczy i oporów przepływu przepływającego przez nie płynu. Silnikiem, w którym pracowały badane rozpylacze był czterosurowy, rzędowy, czterocylindrowy, turbodoładowany silnik o zapłonie samoczynnym z wysokociśnieniowym zasobnikowym układem zasilania w paliwo i wtryskiem bezpośrednim 2.7 Andoria ADCR 0501 – EURO4, wyprodukowany przez zakłady Andoria-Mot Sp. z o.o. w Andrychowie, pracujący na hamowni silnikowej z hamulcem elektrowirowym (rys. 3). Przed badaniem każdego z paliw do jednego z cylindrów silnika montowano taki nowy wtryskiwacz i podłączano układ zasilania w paliwo do zbiornika zawierającego odpowiednie paliwo. Po włączeniu silnik pracował na tym paliwie z odłączonym powrotem do zbiornika paliwa do chwili, gdy ok. 8 litrów paliwa zostało przelane do oddzielnego pojemnika. Dopiero wtedy przewód przelewowy łączono ze zbiornikiem. Przy całkowitej pojemności hamownianego układu zasilania w paliwo bez zbiornika wynoszącej ok. 2 litrów, przeprowadzenie takiego procesu płukania układu zasilania dawało pewność, że w zasadniczej części testu spalane będzie tylko właściwe, aktualnie badane paliwo. Na rys. 4 przedstawiono używane rozpylacze po ich pracy w silniku – wyraźnie widać na nich zgromadzone osady.

3. Wyniki pomiarów

W efekcie przeprowadzonego eksperymentu otrzymano czasowe przebiegi zmian ciśnienia powietrza sprężonego w zbiorniku stanowiska pomiarowego i rozprężającego się do atmosfery przez nieszczelności jakimi były otwory zastosowanych rozpylaczy.

Na rys. 5a pokazano uzyskane przebiegi dla rozpylaczy fabrycznie nowych. Wyraźne jest podobieństwo tych przebiegów dla wybranych rozpylaczy. Wstępną przybliżoną ocenę tego podobieństwa (statystyczne badanie hipotez o porównywalności otrzymanych przebiegów ciśnień zostało przedstawione w innej pracy) przeprowadzono w ten sposób, że dla każdej z 64 chwil pomiaru ciśnienia wyznaczono średnie wartości zarejestrowanych ciśnień dla wszystkich wtryskiwaczy, rozpiętości wartości tych ciśnień (różnice ich wartości maksymalnej i minimalnej) oraz ich odchylenia standardowe. Średnia dla wszystkich chwil pomiaru rozpiętość uzyskanych wartości ciśnień to zaledwie ok. 10 kPa, czyli ok. 5,6% wartości średnich, przy czym rozpiętość ta nie przekroczyła wartości 25,6 kPa, czyli ok. 10,5% odpowiedniej wartości średniej. Odpowiednio średnie odchylenie standardowe tych ciśnień to ok. 3,6 kPa i nie przekroczyło ono wartości 9 kPa, co dla tzw. współczynników zmienności (ilorazów odchylenia standardowego i średniej arytmetycznej przemnożonych przez 100) dało ich wartość średnią 2% i nie przekraczającą 3,9%. Brak identyczności otrzymanych przebiegów dla fabrycznie nowych wtryskiwaczy świadczy o jakości ich produkcji oraz wymusza przyjmowanie indywidualne dla każdego egzemplarza wtryskiwacza parametrów służących do obliczania procesu wtrysku przez oprogramowanie sterownika silnika.



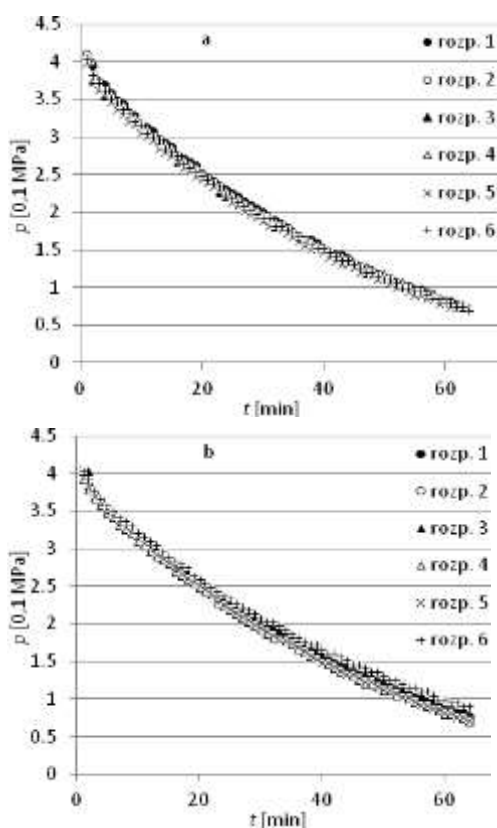
Rys. 3. Pomieszczenie hamowni silnikowej z widocznym hamulcem na pierwszym planie i badanym silnikiem w głębi.



Rys. 4. Wygląd wykorzystanych rozpylaczy po ich pracy w silniku napędzonym olejem napędowym (ON) i pięcioma badanymi mieszaninami biopaliw B1÷B5.

Na rys. 5b pokazano uzyskane przebiegi dla rozpylaczy po ich pracy w silniku. Również wyraźne jest podobieństwo tych przebiegów, przy czym wyraźnie wolniejszy spadek ciśnienia zarejestrowano dla rozpylacza 6, przez który podawane było biopaliwo B5. Teraz przy wstępnej przybliżonej ocenie tego podobieństwa wyznaczono wartości tych samych co powyżej wielkości uzyskując: średnia dla wszystkich chwil pomiaru rozpiętość uzyskanych wartości ciśnień to ok. 15,6 kPa, czyli ok. 10% wartości średnich, przy czym rozpiętość ta nie przekroczyła wartości 25,6 kPa, czyli ok. 27% odpowiedniej wartości średniej, średnie odchylenie standardowe tych ciśnień to ok. 5 kPa i nie przekroczyło ono wartości 9 kPa, co dla współczynników zmienności dało ich wartość średnią 3,5% i nie przekraczającą 8,1%.

Na rys. 6 przedstawiono porównania zarejestrowanych przebiegów ciśnień powietrza rozprężającego się przez otwory rozpylaczy nowych i po ich pracy w silniku zasilanym badanymi paliwami.



Rys. 5. Wartości ciśnień powietrza zarejestrowane w trakcie eksperymentu.

a – dla wtryskiwaczy fabrycznie nowych
b – dla wtryskiwaczy po ich pracy w silniku przez rozpylacz 1 podawano olej napędowy przez rozpylacz 2 podawano biopaliwo B1 przez rozpylacz 3 podawano biopaliwo B2 przez rozpylacz 4 podawano biopaliwo B3 przez rozpylacz 5 podawano biopaliwo B4 przez rozpylacz 6 podawano biopaliwo B5

Bardzo wyraźnie widać, że największe różnice otrzymano dla rozpylacza 6, przez które podawano biopaliwo B5.

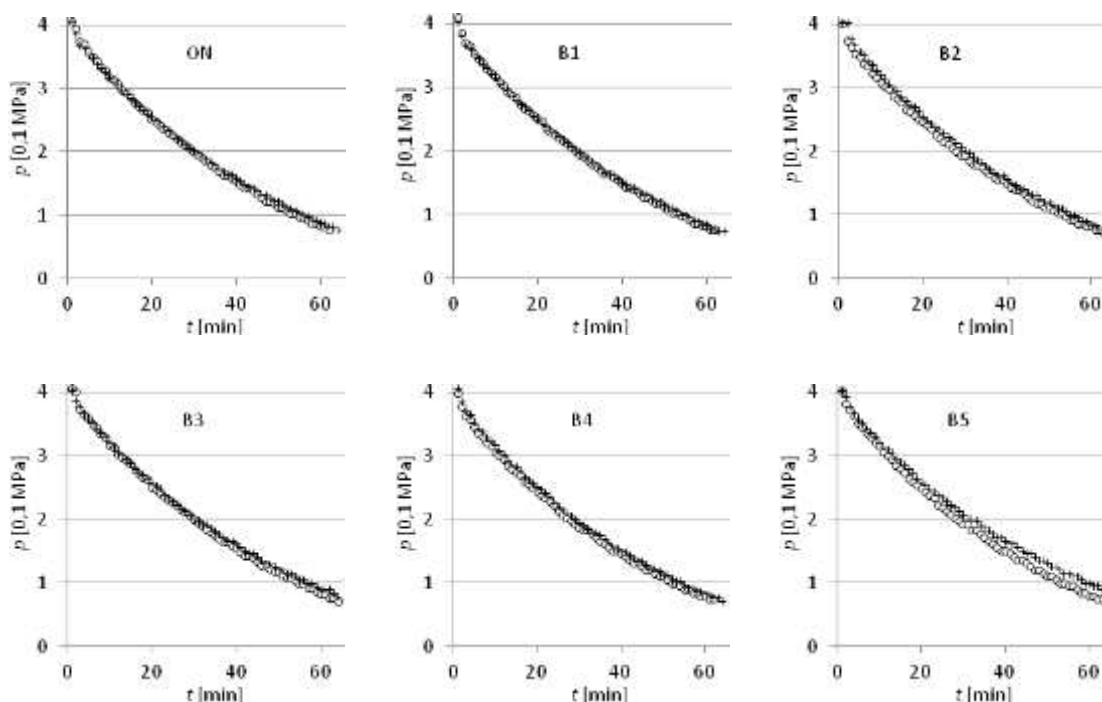
Otrzymane eksperymentalne czasowe przebiegi ciśnień powietrza rozprężającego się z butli do atmosfery przez otwory rozpylaczy mają charakter nieliniowy, na pierwszy rzut oka układają się bowiem w krzywe typu eksponensjalnego lub wielomianowego. Korzystając z możliwości standardowego oprogramowania wyznaczono więc krzywe regresji o postaci $p = be^{at}$ oraz $p = ct^2 + bt + a$, a jakość ich dopasowania oceniono na podstawie wartości kwadratu współczynnika korelacji liniowej Pearsona r między eksperymentalnymi i odpowiednimi dla danej regresji wartościami ciśnienia (czyli tzw. współczynnika determinacji). Uzyskane postaci zastosowanych regresji krzywoliniowych i wartości przyjętej miary ich dopasowania do przebiegów eksperymentalnych przedstawiono w tab. 2. Jak widać obie postaci krzywej regresji dają bardzo dobre dopasowanie do uzyskanych przebiegów eksperymentalnych. Minimalnie lepszy wydaje się wielomian, jednak trzeba pamiętać o fizycznym charakterze opisywanego zjawiska (fizyka „woli” eksponensa) i o tym, że im wyższy będzie stopień wielomianu aproksymującego tym liczbowo uzyska się lepsze dopasowanie (w skrajnym przypadku stopnia wielomianu równego liczbie aproksymowanych punktów dopasowanie będzie idealne). Współczynnikom regresji eksponensjalnej, przy ich generalnie porównywalnych wartościach dla wszystkich przebiegów ciśnień, można przypisać następujące znaczenie: a charakteryzuje szybkość obserwowanych zmian i ma bardziej znaczący, wykładniczy wpływ na obserwowaną zmianę wartości ciśnienia powietrza, b jest czynnikiem skalującym i ten wpływ ma mniej znaczący, iloczynowy. Porównując wartości uznanego za bardziej znaczący, wykładniczego ujemnego współczynnika a widać, że dla wszystkich par krzywych rozpylacz czysty – rozpylacz z osadami wystąpił jego wzrost, czyli praca w silniku zasilanym każdym z badanych paliw spowodowała zmniejszenie intensywności wypływu powietrza przez otwory rozpylacza do atmosfery i spadku jego ciśnienia w zbiorniku. Najmniejszy wzrost wartości a zanotowano dla paliwa B3 (o ok. 0,00006), większy dla paliw B1 i B4 (o ok. 0,0005) oraz B2 (o ok. 0,0006), następnie dla oleju napędowego (o ok. 0,0012) i największy dla paliwa B5 (o ok. 0,0034, prawie trzykrotnie więcej niż dla oleju napędowego). Odnosząc ten wynik (duża ilość osadów zgromadzonych na rozpylaczu) do przytoczonych wyżej wyników badań hamownianych (zwłaszcza dużego zadymienia, dużych emisji węglowodorów i tlenków węgla oraz małej pozostałości tlenu w spalinach) można przyjąć, że biopaliwo to jest trudno rozpylić i odparować oraz że jego cząsteczki zawierają duże ilości węgla w stosunku do wodoru i tlenu.

3. Wnioski

Wydaje się, że przyjęta prosta metoda oceny wielkości otworów rozpylaczy w zupełności wystarcza i nadaje się do oceny rozpylaczy pod kątem oporów przepływu stawianych przez nie przepływającym przez nie płynem, nie tylko zastosowanemu w eksperymencie powietrzu, ale też paliwom.

Brak identyczności fabrycznie nowych rozpylaczy powoduje, przy wymogu porównywalności

pracy wszystkich cylindrów silnika, konieczność indywidualnego sterowania procesem wtrysku paliwa do każdego z cylindrów silnika. Jednocześnie wymiana danego egzemplarza wtryskiwacza na inny, o innych parametrach rozpylania paliwa, wymaga odpowiedniego przesterowania urządzenia sterującego procesem wtrysku przez nowy wtryskiwacz.



Rys. 6. Wartości ciśnień powietrza dla rozpylaczy nowych (kółka) i po pracy w silniku (krzyżki) zasilanym kolejno olejem napędowym (ON) i pięcioma badanymi mieszaninami biopaliw (B1÷B5).

Tab. 2a. Postacie wybranych krzywych regresji aproksymujących eksperymentalne przebiegi ciśnień dla fabrycznie nowych rozpylaczy.

Nr rozp.	$p = be^{at}$			$p = ct^2 + bt + a$			
	b	a	r^2	c	b	t	r^2
1	4,244	-0,026214	0,99598	0,000448	-0,0816	3,99	0,99875
2	4,194	-0,026523	0,99620	0,000504	-0,0822	3,96	0,99824
3	4,116	-0,026463	0,99623	0,000482	-0,0797	3,87	0,99842
4	4,250	-0,026243	0,99558	0,000482	-0,0810	3,99	0,99836
5	4,100	-0,026731	0,99625	0,000497	-0,0807	3,86	0,99841
6	4,190	-0,026640	0,99576	0,000488	-0,0810	3,92	0,99859

Tab. 2a. Postacie wybranych krzywych regresji aproksymujących eksperymentalne przebiegi ciśnień dla rozpylaczy po ich pracy w silniku.

Nr rozp.	$p = be^{at}$			$p = ct^2 + bt + a$			
	b	a	r^2	c	b	t	r^2
1	4,165	-0,025008	0,99635	0,000446	-0,0772	3,93	0,99868
2	4,169	-0,026049	0,99595	0,000468	-0,0792	3,92	0,99864
3	4,249	-0,025845	0,99578	0,000471	-0,0801	3,99	0,99842
4	4,126	-0,026184	0,99564	0,000460	-0,0781	3,87	0,99895
5	4,188	-0,026238	0,99635	0,000486	-0,0807	3,94	0,99859
6	4,129	-0,023239	0,99536	0,000480	-0,0755	3,96	0,99852

Gromadzenie się osadów na zastosowanych rozpylaczach podczas pracy silnika zasilanego różnymi badanymi paliwami jest zauważalne, pomimo dość krótko trwającego eksperymentu, bo ok. 8-godzinne, co często w warunkach normalnej eksploatacji jest zaledwie jednym dniem pracy silnika. Największą zdolność do gromadzenia się osadów, wyraźnie większą niż dla standardowego oleju napędowego, stwierdzono dla biopaliwa o symbolu B5. Odnosząc to do dużej emisji węglowodorów i tlenków węgla, małej pozostałości tlenu i dużego zadymienia spalin w silnika zasilanego tym paliwem można przypuszczać, że wynika to z dużego udziału węgla w stosunku do wodoru i tlenu w cząsteczkach tego paliwa. Dla pozostałych badanych biopaliw zaobserwowano zdolność do gromadzenia się osadów mniejszą niż dla standardowego oleju napędowego.

Bibliography/Literatura

- [1] Quigeley R., Barbour R., Fahey E., Arters D., Wetzel W., Ray J.: A Study of The Internal Diesel Injector Deposit Phenomenon. TAE Fuels 7th Annual Colloquium, January 2009.
- [2] Chapman L.: Diesel Soap – Formation and Related Problems. National Tanks Conference, Boston, MA September 21, 2010.
- [3] Ullmann J., Geduldung M., Stutzenberger H., Caprotti R., Balfour G.: Investigation into the Formation and Prevention of Internal Diesel Injector Deposits. SAE Technical Paper No 2008-01-0926.
- [4] Caprotti R., Bhatti N., Balfour G.: Deposit Control in Modern Diesel Fuel Injection Systems. SAE Technical Paper No 2010-01-2250.
- [5] Caprotti R., Breakspear A., Graupner O., Klaua T., Kohnen O.: Diesel Injector Deposits Potential In Future Fueling Systems. SAE Technical Paper No. 2006-01-3359.
- [6] Barker J., Richards P., Goodwin M., Wooler J.: Influence of High Injection Pressure on Diesel Fuel Stability: A Study of Resultant Deposits. SAE Technical Paper No 2009-01-1877.
- [7] Struś M. S.: Ocena wpływu biopaliw na wybrane właściwości eksploatacyjne silników o zapłonie samoczynnym. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2012.

Mr Grzegorz Boruta, PhD., Eng. – Assistant Professor in the Faculty of Technical Sciences at University of Warmia and Mazury in Olsztyn.

Dr inż. Grzegorz Boruta – adiunkt na Wydziale Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.



Mr Arkadiusz Olejnik, MSc., Eng. – Technician in the Faculty of Technical Sciences at University of Warmia and Mazury in Olsztyn.

Mgr inż. Arkadiusz Olejnik – technik na Wydziale Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.



Mr Andrzej Piętaś, DSc., Eng. – Professor in the Faculty of Technical Sciences at University of Warmia and Mazury in Olsztyn.

Dr hab. inż. Andrzej Piętaś – profesor na Wydziale Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.



Mr Mieczysław Struś, DSc., Eng. – Professor in the Faculty of Mechanical and Power Engineering at Wrocław University of Technology.

Dr hab. inż. Mieczysław Struś – profesor na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej.

