

## OCENA PROCESU AKTYWNEJ REGENERACJI UKŁADU DPF POJAZDU DOSTAWCZEGO

Bogusław Cieślukowski

*Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie*

**Streszczenie.** Zaprezentowano zagadnienie tworzenia się osadów w filtrze cząstek stałych w wyniku stosowania oleju napędowego z udziałem biokomponentów jako współczesnego paliwa do zasilania silników z ZS. Analizy przeprowadzono na przykładzie filtra DPF pojazdu dostawczego wykorzystywanego w transporcie produktów dla potrzeb gospodarstwa sadowniczego. Ocenę procesu aktywnej regeneracji filtra dokonano z wykorzystaniem metod fluorescencji rentgenowskiej z dyspersją energii oraz metod spektroskopii w podczerwieni.

**Słowa kluczowe:** Filtr DPF cząstek stałych, analiza spektralna, cząstki stałe PM

### Wstęp

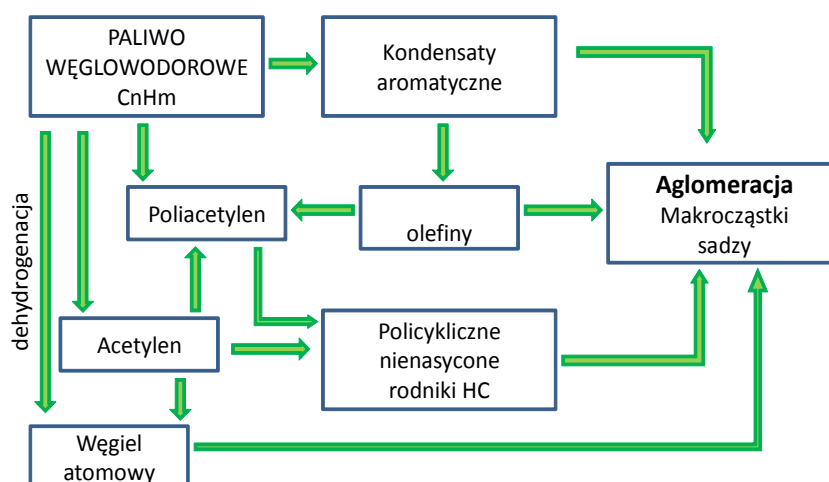
Graniczna emisja cząstek stałych PM (Particulate Matter) stanowi równorzędne kryterium w stosunku do emisji toksycznych składników spalin w silnikach z ZS. Punkt ciężkości badań nad obniżeniem toksyczności spalin silników ZS przesunął się w kierunku wyjaśnienia zjawisk powstawania cząstek stałych oraz możliwości obniżania ich emisji [Rokosz 2007].

Szkodliwe oddziaływanie cząstek stałych wnikaających w środowisko zbioru plodów rolnych wynika z faktu małego wymiaru cząstki i podatności w strukturę materii. Cząstki te absorbują metale ciężkie, związki siarki i azotu oraz węglowodory WWA (wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne), wśród których mogą wystąpić substancje pośrednio bądź bezpośrednio kancerogenne [Kortylewski 2005]. Prowadzone są prace badawcze nad doskonaleniem zarówno procesu roboczego silników, jak też właściwości paliw [Merkisz 1997]. Pod tym względem obiecujące są systemy polepszające sterowanie mieszaniny palnej wraz z kontrolą procesu spalania z udziałem systemów recyrkulacji spalin. Zaznacza się ponadto rozwój metod aktywnej regeneracji filtrów cząstek stałych DPF (Diesel Particulate Filter), przy równoczesnym procesie optymalizacji pakietów uszlachetniczy paliwa [Rokosz 2007]. Cząstki stałe powstające w wyniku silnikowego spalania paliw, to efekt niepełnego i niecałkowitego miejscowego spalania paliwa, prowadzące do powstania nieutlenionych cząsteczek węgla połączonych w aglomeraty o różnej wielkości. Średnica pojedynczej cząstki sadzy waha się od 0,01-0,05  $\mu\text{m}$ , przy czym w strumieniu spalin mogą występować ich zlepki przyjmując średnicę nawet 1  $\mu\text{m}$  [Kortylewski 2005].

Zjawisko powstawania oraz wzrost cząstek sadzy warunkowane jest procesami dehydrogenacji cząstek paliwa, prowadząc do wytworzenia acetylenu a także polimeryzacji i cyklizacji rozłożonych węglowodorów, wytworzenia wolnych rodników i ciężkich

kompleksów węglowych o strukturze wielopierścieniowej (rys.1.). Gwałtowny wzrost cząstek sadzy, ma podstawy w procesie koagulacji zderzanych cząstek przy małej wartości energii aktywacji, co może powodować bezpośredni rozpad molekuł węglowodorowych bez zaistnienia pośrednich procesów polimeryzacji [Kortylewski 2005].

Makrostrukturę płytkową sadzy cechuje współśrodkowy układ. Stosy płytek powiązane są ze sobą siłami Van der Waalsa tworząc kryształit a następnie makro-cząstkę złożoną z 1000-1500 kryształitów.



Rys. 1. Schemat powstawania PM w procesie spalania paliw węglowodorowych [Cieślikowski 2010a]

Fig. 1. The scheme of PM formation in the combustion process of hydrocarbon fuels [Cieślikowski 2010a]

### Uwarunkowania procesu regeneracji filtra DPF

Modele korelacyjne i fizykochemiczne opisujące zjawiska powstawania PM odnoszą się zarówno do wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych silnika i kształtowania procesu spalania w rzeczywistej komorze, jak również do poprawy cech fizykochemicznych paliwa i przebiegu procesu wtrysku. Zakłada się, że dla rozpatrywanego paliwa proces formowania cząsteczek sadzy jest funkcją czasowych zmian temperatury procesu na tle niejednorodnej stechiometrii mieszaniny paliwowo-powietrznej. Zatem część dawki paliwa podlega reakcjom pirolitycznym, a ich efektem jest wykładniczy proces nadwyżki paliwa do powietrza w strefach płomienia, w których zachodzi produkcja sadzy [Kortylewski 2005]. Wnioskować można zatem, że skład paliwa a tym samym jego właściwości fizykochemiczne mają duży wpływ na powstawanie cząstek stałych.

Ciągłe ograniczanie emisji składników toksycznych spalin i cząstek PM prowadzi do powstawania coraz to nowszych i lepszych rozwiązań filtrów cząstek stałych. Ograniczenie

emisji toksycznych składników zawartych w spalinach ma swoje podłoże w komputerowym modelowaniu komór spalania wraz z poprawą cech fizykochemicznych paliw - głównie przez obniżenie zawartości siarki, zwiększenie liczby cetanowej (LC), obniżanie zawartości węglowodorów aromatycznych, poprawienie właściwości niskotemperaturowych paliw. Eksperymenty badawcze obejmują ponadto selektywne komponowanie paliw z biopaliwami wraz z dobranymi pakietami uszlachetniaczy [Cieślikowski, Jakóbiec 2010].

Badania porównawcze emisji toksycznych składników spalin silnika AD3.152 UR stosowanego w ciągniku MF przy zasilaniu ON i biopaliwami B10, B20, B30 wykazały znaczne obniżenie emisji HC, CO w przypadku stosowania biopaliw B10 i B20 przy zdecydowanie niższym stopniu zadymienia spalin, przy czym zaobserwowano znaczny wzrost poziomu emisji  $\text{NO}_x$  [Jakóbiec, Ambrozik 2007].

Układy oczyszczania spalin z cząstek stałych stosowane we współczesnych silnikach z ZS wytrącają cząstki PM na nośniku filtracyjnym o porowatej strukturze. Czujniki elektroniczne kontrolują ciśnienie nasycenia filtra oraz temperaturę gazów przed i za filtrem w odniesieniu do wartości masowego natężenia przepływu powietrza w układzie dolotowym silnika.

Proces spalania całkowitego sadzy wymaga temperatury przekraczającej  $600^\circ\text{C}$ , co możliwe jest dla silników z ZS w warunkach bliskich maksymalnej mocy. Prowadzone są badania nad skutecznością pasywnych metod regeneracji filtrów DPF z udziałem płynów katalitycznych Eloys DPX42 aplikowanych bezpośrednio do paliwa przez pompę zintegrowaną z zasobnikiem płynu [Cieślikowski 2010]. Eksploatacja współczesnych ciągników wyposażonych w układy DPF zasadniczo sprzyja samoczynnemu oczyszczaniu filtra w przypadku długotrwałych prac agrotechnicznych przy nominalnym obciążeniu silnika (np orka). Zasadniczy problem pojawia się w przypadku długotrwałej eksploatacji silnika na biegu jałowym gdy temperatura na wlocie do filtra DPF zawiera się w przedziale  $150\text{-}200^\circ\text{C}$ . Rozpatrywany przykład pojazdu dostawczego dla celów dystrybucji płodów rolnych stanowi odzwierciedlenie niedogodnego stanu eksploatacji filtra DPF.

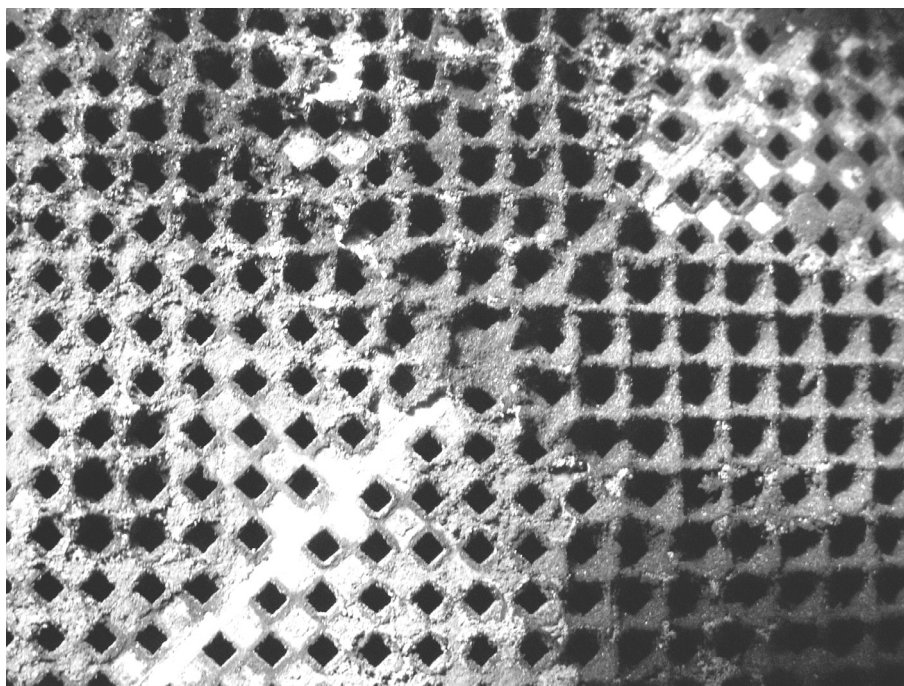
Proces regeneracji aktywnej filtra DPF w systemach wtrysku paliwa Common Rail polega na podaniu dodatkowej części dawki paliwa po zwrocie zewnętrznym tłoka w fazie rozprężania, powodując wzrost temperatury spalin do około  $350\text{-}400^\circ\text{C}$ . Rozgrzane spaliny trafiają do filtra, w którym następuje katalityczne dopalanie węglowodorów pochodzących z dodatkowej dawki paliwa, w wyniku czego temperatura spalin wzrasta do około  $450\text{-}500^\circ\text{C}$  [Rokosz 2007].

Zasadniczy problem procesu oczyszczania filtra wynika ze zwartego charakteru osadu tworzonego przez cząsteczki, o wymiarze głównie poniżej  $1\mu\text{m}$ , utrudniając w ten sposób proces dopalania w przekroju poprzecznym warstwy osadu. Ponadto istnieje niebezpieczeństwo uzyskania ponadnormatywnych temperatur spalania powyżej  $1000^\circ\text{C}$ , zwłaszcza gdy osad wzbogacany jest olejem z układu smarowania silnika. Procesowi dopalania (regeneracji) towarzyszy bardzo wysoka emisja HC podczas wypalania filtra oraz odkładanie się produktów reszkowych o zwartej strukturze, co prowadzi do postępującego wzrostu oporów przepływu gazów spalinowych i skrócenia czasu użytkowania filtra.

## Cel i zakres badań

Celem prowadzonych badań było określenie wpływu stosowania oleju napędowego z udziałem biokomponentów jako współczesnego paliwa do zasilania silników z ZS pojazdów dostawczych, na proces tworzenia się osadów w filtrze cząstek stałych. Wnioskowanie ukierunkowano na zagadnienie zużywania się filtrów cząstek stałych, poprzez określenie zawartości wytraconych w filtrze składników nieutlenionych pochodzenia organicznego. Przedmiotem badań był układ oczyszczania spalin silnika 2,5 TDI samochodu dostawczego wykorzystywanego do prac transportowych w gospodarstwie sadowniczym.

Zakres pracy obejmował przeprowadzenie badań laboratoryjnych filtra cząstek stałych po dwuletnim okresie eksploatacyjnym silnika na paliwach z dodatkiem biokomponentów. Po przebiegu 140 tys. km nastąpił demontaż sprawnego filtra a wkład absorpcyjny (przedstawiony na rys.2.) został poddany badaniom spektralnym. Zagadnienia te wyznaczają zasadniczą problematykę eksploatacyjną dla użytkowników współczesnych silników z ZS przy zakładanym wzroście procentowego udziału dodatków FAME do ON. Prowadzone badania mają określić skuteczność aktywnego oczyszczania filtra cząstek stałych przy zasilaniu mieszaninami ON i FAME.



*Źródło: Dokumentacja fotograficzna prac badawczych UR w Krakowie.*

Rys. 2. Osady zalegające wlotową stronę badanego filtra DPF  
Fig. 2. Sediments filling the inlet side of the diesel particulate filter

Analizy spektralne osadów pobranych z filtra zostały wykonane w certyfikowanym laboratorium Instytutu Technologii Nafty i Gazu w Krakowie w zakresie:

- pobrania próbek osadów ze strefy czołowej i środkowej kanalików i wykonanie analizy chemicznej metodą absorpcji rentgenowskiej z dyspersją energii oraz wykonanie analizy chemicznej metodą absorpcyjnej spektroskopii w podczerwieni,
- pobranie ekstraktu z plastra wyciętego ze strefy czołowej i środkowej filtra a następnie wykonanie analizy chemicznej metodą absorpcyjnej spektroskopii w podczerwieni.

Widma fluorescencji rentgenowskiej z dyspersją energii XRF ED rejestrowane były na analizatorze ED 2000 firmy Oxford Instruments, natomiast widma w podczerwieni (FTIR) na analizatorze FTS 175 firmy BIO-RAD.

## Analiza wyników

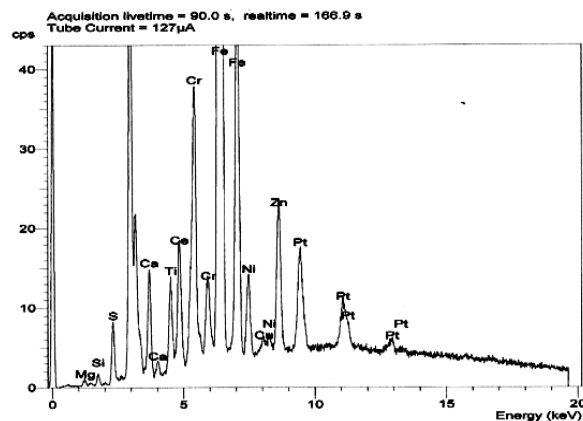
Pierwszy etap prac laboratoryjnych ukierunkowany został na pozyskanie widma fluorescencji pierwiastków będące wynikiem analizy próbek metodą spektroskopii w promieniowaniu rentgenowskim z dyspersją energii (rys.3). Próbki były wystawione na akwizycję promieniowania przez czas 90 s. Rzeczywisty czas całkowity pomiaru wynosił od 150 do 171 s w zależności od próbki.

Widmo fluorescencji rentgenowskiej z dyspersją energii dla osadu pobranego z kanalików filtra wykazuje udział żelaza zaznaczający wysokie wartości w skali odniesienia. Pakiety dodatków do biopaliw zawierające depresatory oparte są na jonach  $Fe^{++}$  [Jakóbiec, Ambrozik 2007]. Dodatkowo można zasugerować utlenianie (korozję) żelaza będącego szkieletem monolitu filtra w postaci stalowej siatki, na którą nałożona jest ceramiczna struktura z węgliku krzemu. Analizując przyczyny znacznego udziału żelaza dokonano porównania udziału żelaza w osadzie kanałowym filtra w stosunku do udziału w materiale pobranym w formie plastrów. Wykazano, iż główną przyczyną osadów jest proces korozji obudowy filtra oraz elementów kolektora wylotowego spalin, co powinno skłonić producentów do stosowania właściwych zamienników materiałowych.

Analiza wykazała ponadto obecność innych związków chemicznych, które występują w pakietach uszlachetniaczy paliwa takich jak antyoksydanty, biocydy, dodatki smarne do paliw, depresatory. W tej grupie wyróżniono: cynk (Zn), miedź (Cu), śladowe ilości wapnia (Ca), cer (Ce), nikiel (Ni), tytan (Ti), oraz chrom (Cr) i ołów (Pb). Przedziały energetyczne widma wykazały ponadto udział siarki (S), która jest wynikiem użytkowania paliw mineralnych o znacznie większej zawartości tego pierwiastka niż w FAME.

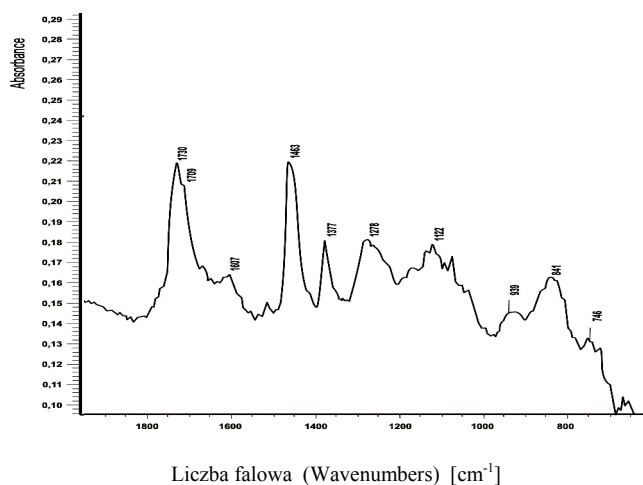
Analiza widmowa spektroskopii w podczerwieni po ekstrakcji próbki pobranej ze struktury absorpcyjnej filtra ukierunkowana została głównie na określenie udziału związków organicznych będących składnikiem osadów stałych w filtrze (rys. 4.).

Pasmo  $1709-1730\text{ cm}^{-1}$  wykazało udział grup karboksylowych  $C=O$  co wskazuje na udział polimerów FAME, głównie jako skutki wprowadzanych dodatków w pakietach uszlachetniających. Efekty zimnych rozruchów silnika zaznaczają swoją obecność w postaci nieopalonnych osadów FAME w paśmie  $1745\text{ cm}^{-1}$ . Jednoznacznie można przypisać grupę kwasów karboksylowych  $COOH$  ( $C=O$ ) w paśmie  $1709\text{ cm}^{-1}$ .



Źródło: Analizy wykonane laboratorium Instytutu Technologii Nafty i Gazu w Krakowie na zamówienie KIMiA UR w Krakowie.

Rys. 3. Widmo fluorescencji rentgenowskiej z dyspersją energii z osadu zgromadzonego w filtrze cząstek stałych: strefa czołowa kanałków filtra  
 Fig. 3. Energy dispersive X-ray fluorescence spectrum from the residual collected in the particulate filter: frontal zone of filter's ducts



Źródło: Analizy wykonane w laboratorium Instytutu Technologii Nafty i Gazu w Krakowie na zamówienie KIMiA UR w Krakowie

Rys. 4. Widmo spektroskopii w podczerwieni po ekstrakcji próbki pobranej ze struktury absorpcyjnej filtra pozwalające ocenić udział związków organicznych w osadzie filtra  
 Fig. 4. Infrared spectroscopy spectrum following the extraction of specimen collected from the filter absorption structure, which allows for estimation of the amount of organic compounds inside the filter

Pasma 1728 cm<sup>-1</sup> wskazuje na udział resztkowych produktów osadu wykazujących pochodzenie estrowe (z wiązaniem podwójnym tlenu). Zakres tej liczby falowej, która jest reprezentatywna dla grup estrowych, wykazuje znacznie niższy udział poziomu absorbancji w stosunku do grupy polimerów FAME.

## Wnioski

1. Analizy widma fluorescencji rentgenowskiej z dyspersją energii w odniesieniu do oceny składu chemicznego osadu zgromadzonego w filtrze cząstek stałych oraz analiza widma spektroskopii w podczerwieni wykonane po ekstrakcji próbki pobranej ze struktury kanalików filtra wykazały udział związków organicznych w osadzie stałym filtra DPF wynikający z udziału FAME w ON.
2. Skuteczność procesu aktywnej regeneracji filtra cząstek stałych zostaje ograniczona poprzez wytrącanie nieutlenionych składników pochodzenia organicznego, powstałych w wyniku niecałkowitego spalania paliwa z udziałem biokomponentów.
3. Osad stały stanowią grupy polimerów FAME pochodzące ze zróżnicowanych pakietów uszlachetniających stosowanych w produkcji biopaliw.

## Bibliografia

- Cieślikowski B.** 2010. Analiza spektralna osadów pobranych z filtra cząstek stałych. Wyd. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe – Autobusy. Nr 11. s. 55-60.
- Cieślikowski B., Jakóbiec J.** 2010. Modification of biofuel usable properties in the aspect of issues involving operation of farm. Inżynieria Rolnicza. Nr 6(124). Kraków. s. 21-27.
- Jakóbiec J., Ambrozik A.** 2007. Badania FAME w zakresie oceny właściwości fizykochemicznych i użytkowych. III Konferencja Naukowa EKOENERGIA 2007. Krasnobród. s. 45-53.
- Kortylewski J.** 2005. Spalanie paliwa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław. s. 34.
- Merkisz J.** 1997. Emisja cząstek stałych przez silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym. Wybrane zagadnienia. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. s. 17.
- Rokosz U.** 2007. Układy oczyszczania spalin i pokładowe systemy diagnostyczne samochodów. WKiŁ Warszawa. s. 44.
- Sadlej J.** 2002. Spektroskopia molekularna. Wydawnictwo Naukowo Techniczne. Warszawa. s. 12.

## **EVALUATION OF THE PROCESS OF ACTIVE REGENERATION OF DPF SYSTEM OF A DELIVERY VEHICLE**

**Abstract.** The issue of sediment formation in the particulate filter as a result of applying diesel oil with biocomponents as modern supply fuel for compression ignition engines was also presented. The analyses were conducted based on the example of diesel particulate filter (DPF) of a delivery vehicle used in fruit farm product transportation. The process of active regeneration was evaluated by means of energy dispersive x-ray fluorescence techniques as well as infrared spectroscopy techniques.

**Key words:** a diesel particulate filter, spectral analysis, particulate matter PM

**Adres do korespondencji:**

Bogusław Cieślowski; e-mail: bcieslikowski@ur.krakow.pl  
Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki  
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie  
ul. Balicka 120  
30-149 Kraków