

**Marek SWAT**

Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom

## **ZASTOSOWANIE DEPOLIMERU JAKO PALIWA DO SILNIKA ZS**

### **Słowa kluczowe**

Paliwa silnikowe, silnik ZS, ochrona środowiska.

### **Streszczenie**

Przedstawiono wyniki własnych badań silnikowych nad zastosowaniem depolimeru jako paliwa do silnika o ZS. Stwierdzono, że najlepsze parametry eksploatacyjne wykazuje paliwo z 20% dodatkiem depolimeru, dla którego zaobserwowano wzrost mocy i momentu oraz sprawności ogólnej silnika w zakresie małych i średnich obciążeń silnika. Przedstawiono wpływ tego typu zasilania na emisję substancji toksycznych w porównaniu z emisją przy zasilaniu paliwem standardowym.

### **Wprowadzenie**

Odpady z tworzyw sztucznych ze względu na dużą odporność na naturalną degradację stają się jednym z podstawowych problemów ekologicznych współczesnego środowiska. Próbuje się rozwiązać problem przez destrukcyjne przetwarzanie takich odpadów we frakcję węglowodorową o szerokim zakresie temperatury wrzenia z możliwością zastosowania jako komponentu paliw silnikowych i opałowych [2, 4, 6]. Większość metod polega na odzyskiwaniu energii z odpadów polimerowych poprzez ich rozkład do związków o niskiej masie

cząsteczkowej na drodze krakingu katalitycznego lub pirolizy [3–9]. Procesy termiczne lub katalityczne na skutek rozpadu wielkocząsteczkowych polimerów generują związki o mniejszej masie cząsteczkowej. Najbardziej korzystnym wydaje się przetwarzanie olefinowych tworzyw sztucznych (niezawierających heteroatomów), dzięki czemu można otrzymywać frakcje węglowodorowe o podobnych własnościach jak frakcje uzyskiwane z przerobu ropy naftowej [2]. Jedną z ogromnych zalet tego typu depolimerów jest to, że pozbawione są zanieczyszczeń związkami, których spalanie niekorzystnie wpływa na środowisko naturalne (związki siarki, chloru, azotu).

## 1. Cel pracy

Zbadanie właściwości użytkowych i toksyczności spalin silnika o ZS, zasilanego paliwem (o właściwościach zbliżonych do oleju napędowego), wytworzonym w wyniku depolimeryzacji odpadowych, olefinowych tworzyw sztucznych, otrzymanego w wyniku realizacji części zadania (Program Wieloletni PW-004) przez Politechnikę Warszawską [4].

## 2. Stanowisko badawcze

Jako obiektu badań użyto silnika o zapłonie samoczynnym AD3.152 pracującego w standardowym układzie hamownianym (rys. 1), którego układ wylotowy wyposażono w układy poboru próbek spalin (do separatora cząstek stałych i analizatora tlenków azotu) oraz sondę analizatora węglowodorów i tlenku węgla.

Pomiaru emisji cząstek stałych dokonywano (na podstawie separowanej masy cząstek określanej metodą grawimetryczną) zgodnie z programowanymi 13-fazowymi testami badawczymi przy pomocy separatora cząstek stałych PTP-2000 z mikrotunelem rozcieńczającym (firmy Pierburg).

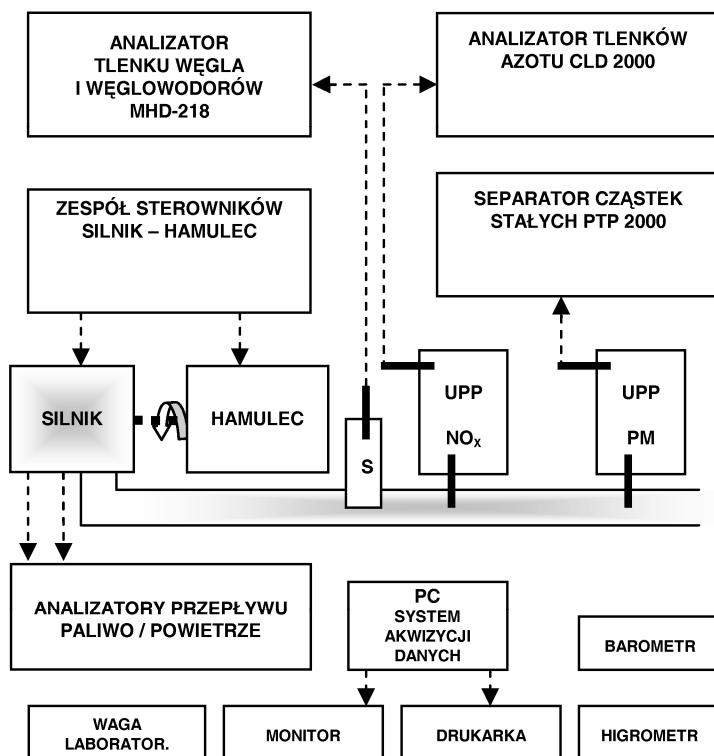
Do pomiarów tlenków azotu użyto analizatora chemiluminescencyjnego CLD-2000 (firmy Pierburg), wykorzystującego zjawisko emisji promieniowania elektromagnetycznego towarzyszącego reakcji tlenku azotu z ozonem.

Do pomiarów stężeń węglowodorów i tlenku węgla w spalinach wykorzystano analizator typu FTIR, model Gastester MHD-218 (firmy Hermann).

Do badań użyto komponentów paliw dostarczonych przez Politechnikę Warszawską (wykonawca części zadania) o charakterystycznych cechach prezentowanych w zestawieniu poniżej (tabela 1). Przyjęto nomenklaturę w opisie wyników badań w postaci np. DEP 20 (oznaczającą 20% udział depolimeru w mieszaninie z olejem napędowym) itd.

Tabela 1. Podstawowe parametry badanych paliw

Lp	Parametry	ON PN-EN 590	DEP 100 DEPOLIMER
1	Liczba cetanowa	51,4	77,1
2	Gęstość w tem. 15°C [g/cm <sup>3</sup> ]	835,4	807
3	Lepkość w temperaturze 40 °C [mm <sup>2</sup> /s]	2,64	3,5
4	Zawartość siarki [mg/kg]	59	0,01

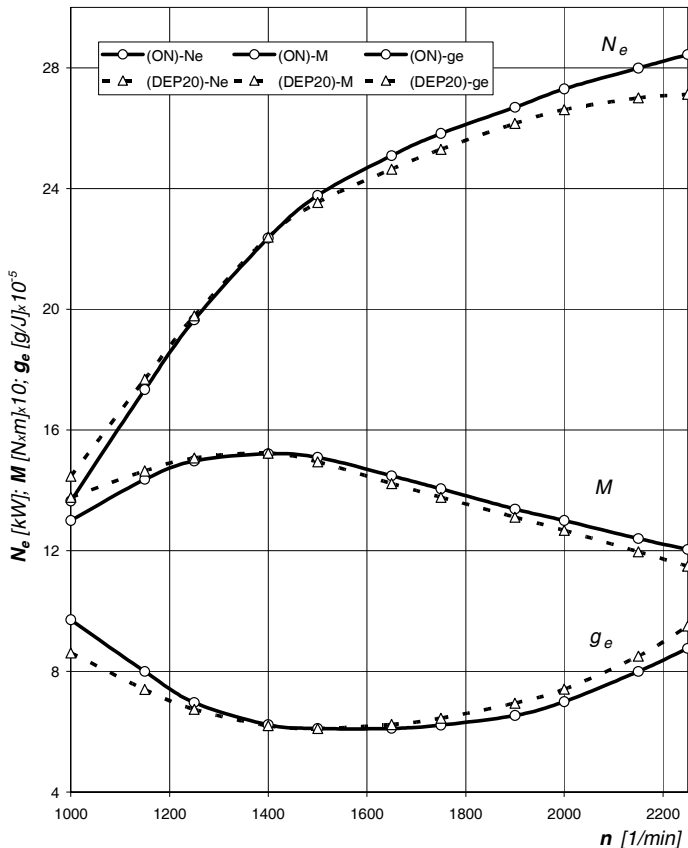
Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego, gdzie: S – sonda analizatora HC i CO, UPP – układy poboru próbek NO<sub>x</sub> i PM

### 3. Wyniki badań

Na podstawie przeprowadzonych badań silnikowych można stwierdzić, że najlepsze parametry eksploatacyjne wykazuje paliwo DEP 20 (rys. 2), dla które-

go zaobserwowano wzrost mocy i momentu oraz sprawności ogólnej silnika w zakresie małych i średnich obciążeni. Największe – 10-procentowe efekty uzyskano dla niewielkich obciążeni silnika na charakterystyce eksploatacyjnej. Dla obrotów wyższych od obrotów maksymalnego momentu obserwowano nieznaczne pogorszenie parametrów pracy silnika, z maksymalnym 4-procentowym spadkiem w zakresie obrotów maksymalnej mocy silnika.

Większy niż 50% udział depolimeru w mieszaninie z olejem napędowym (rys. 3) powoduje już wyraźne pogorszenie warunków pracy silnika i jego osiągnięć (spadek mocy i momentu dochodzący do 15% i spadek sprawności o 20%), zwłaszcza w zakresie najwyższych obciążeni, przy zasilaniu silnika czystym depolimerem (DEP100) – rys. 4. Główną przyczyną obserwowanego zjawiska jest mniejsza gęstość paliwa depolimerowego DEP100 i jego większa lepkość.



Rys. 2. Charakterystyka badanego silnika zasilanego olejem napędowym (ON) i paliwem DEP 20 (komponent z udziałem 20% depolimeru)

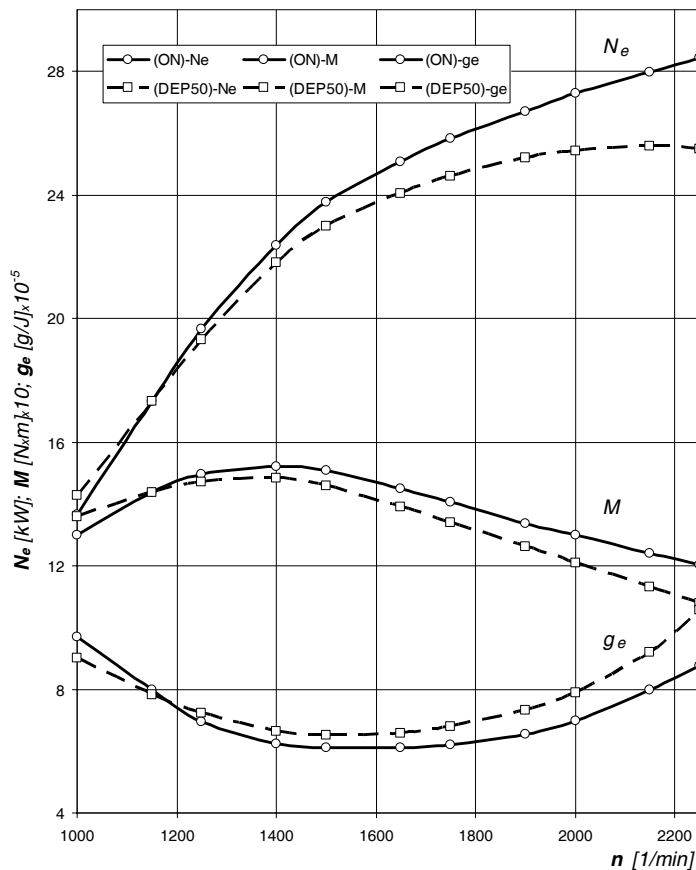
Dodatkowy efekt kumulacyjny to znacznie większa liczba cetanowa depolimeru (LC 77,1), która powoduje wyraźne zmniejszenie opóźnienia samozapłonu [1] gorzej rozpylonej mieszaniny paliwowej (większa lepkość) i zmianę charakteru (zwłaszcza początku spalania) z kinetycznego na dyfuzyjny. Im większe obciążenie (większa dawka paliwa), tym większa część procesu spalania przebiega w mieszaninie niejednorodnej, z dużym udziałem procesów dyfuzji (jednoczesne mieszanie paliwa z powietrzem, częściowo podczas trwającego jeszcze wtrysku paliwa). Zmiana „organizacji” procesu spalania przez wyraźne ograniczenie chemicznej części opóźnienia samozapłonu (zwłaszcza tzw. chłodnego i błękitnego płomienia) [10] i mniejsza gęstość paliwa DEP 100 powodują w efekcie pogorszenie warunków pracy silnika i znaczny spadek jego sprawności.

Porównanie parametrów eksploatacyjnych silnika zasilanego paliwem standardowym i paliwami komponentowymi z różnym udziałem procentowym depolimeru przedstawiono na rys. 5.

Na rys. 6 przedstawiono porównanie emisji cząstek stałych PM silnika zasilanego olejem napędowym i paliwami o różnym składzie komponentowym oleju napędowego i depolimeru oraz czystym (100%) depolimerem. Z prezentowanego materiału badawczego wynika, że ze względu na emisję cząstek stałych największe 15-procentowe efekty w ograniczeniu tej emisji można uzyskać dla mieszanek paliwowych zawierających 30–40% depolimeru.

Prawdopodobnie główną przyczyną mniejszej emisji PM jest eliminacja siarczanowej części nierozpuszczalnej frakcji *INSOL* cząstek (a tym samym redukcja całkowitej ilości masy cząstek), ponieważ paliwo depolimerowe nie zawiera w swoim składzie pierwiastkowym siarki. Odbywa się to dzięki większemu udziałowi beziarkowego paliwa w procesie formowania cząstek na etapie tworzenia sadzy wtórnej, która powstaje najczęściej z sadzy pierwotnej w okresie, który rozpoczyna się jeszcze przed otwarciem zaworu wylotowego i trwa aż do wydalenia spalin poza układ wylotowy. W warunkach szybko obniżającej się temperatury, wynikającej z rozprężania i ochładzania spalin, krystalizacja sadzy łączy się w struktury agregatowe i aglomeratowe, a dodatkowo warunki te sprzyjają niskotemperaturowej cyklizacji związków poliacetylenowych, które po odwodornieniu przyjmują postacie wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych i ciężkich węglowodorów. Spadek temperatury spalin sprzyja także zamrażaniu przejściowych struktur chemicznych na etapie częściowego utlenienia lub niedokończonego ich rozpadu. Węglowodory te w stanie gazowym lub skondensowanym są adsorbowane przez powierzchnie agregatów i aglomeratów sadzy. W tych warunkach ma miejsce ciągła przebudowa struktur ciężkich węglowodorów i zmiana ich stanu skupienia. Lokalnie węglowodory w fazie gazowej mogą kondensować i osiadać na powierzchniach sadzy i innych cząstek (np. siarczany i azotany) lub odwrotnie, parować i oddzielać się od tych cząstek.

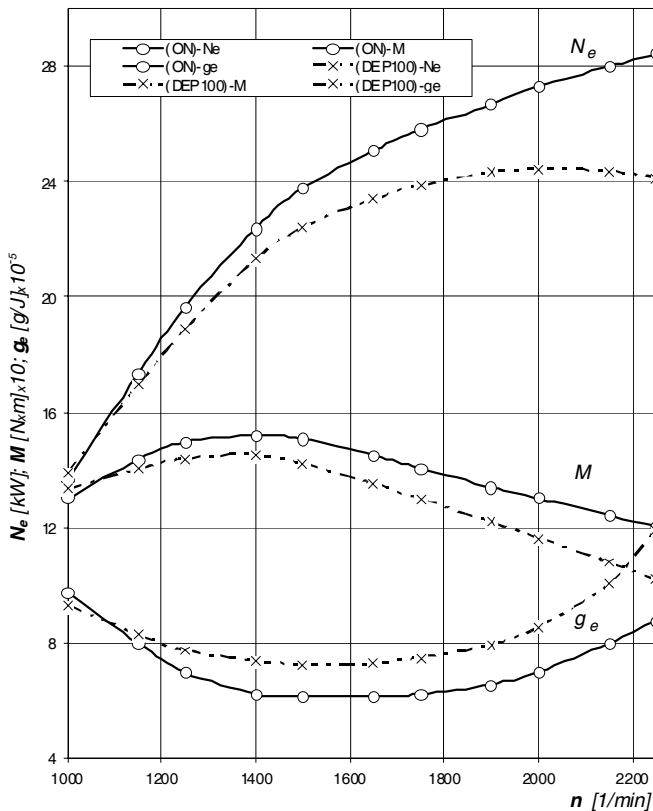
W składzie strukturalnym cząstek stałych dominuje forma siarczanowa. Siarka zawarta w paliwie prawie całkowicie utlenia się w procesie spalania do  $\text{SO}_2$  i w większości w takiej formie zostaje usuwana ze spalinami, pozostała część podlega konwersji do  $\text{SO}_3$ , tym większej im wyższe: temperatura i stężenie tlenu w spalinach. Trójtlenek siarki przez wysokie powinowactwo do wody (w reakcji egzotermicznej tworzy się kwas siarkowy), tworzy siarczany adsorbowane przez sadzę silnikową, powodując przyrost nierozpuszczalnej frakcji *INSOL* cząstki stałej.



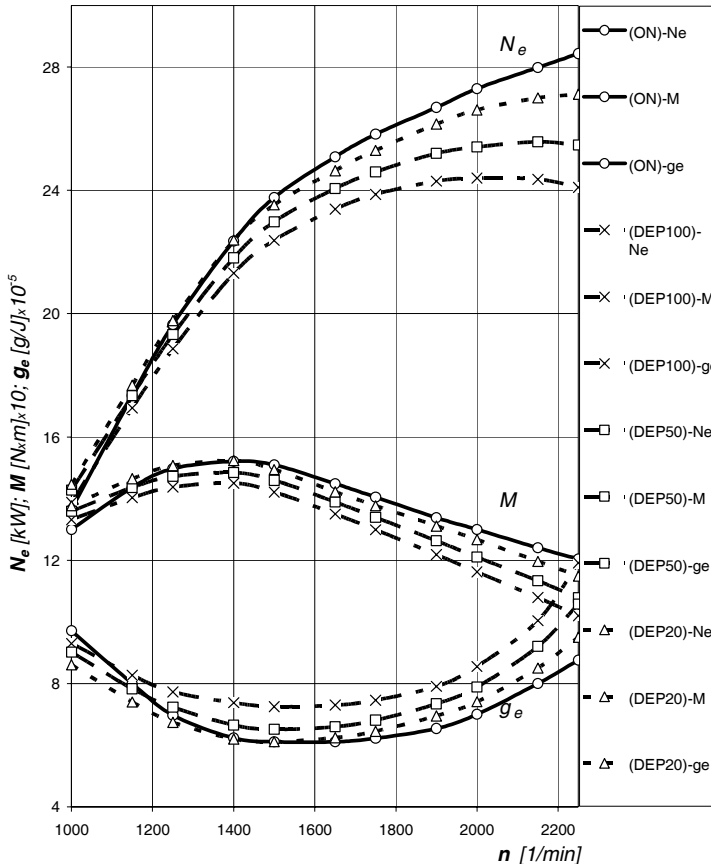
Rys. 3. Charakterystyka badanego silnika zasilanego olejem napędowym (ON) i paliwem DEP 50 (komponent z udziałem 50% depolimeru)

Mniejszy udział tlenu wiązanej w formie siarczanowej frakcji *INSOL* cząstki stałej i wiązania nienasycone w strukturze paliwa sprzyjają zmniejszeniu opóźnienia samozapłonu ([1]) i pełniejszemu spalaniu mieszanin z udziałem depolimeru. Ponieważ rozpylenie tego paliwa przebiega inaczej niż oleju napę-

dowego (ze względu na różnice w lepkości obu paliw), więc intensyfikacja procesu spalania powoduje wzrost lokalnych temperatur spalania, co sprzyja zwiększeniu emisji tlenków azotu (patrz zestawienie i rys. 7). Prawdopodobnie większa aktywność tlenu i wyższe temperatury spalania powodują, że sadza pierwotna zostaje w znacznym stopniu spalona w komorze spalania, co przy jednoczesnym uwolnieniu HC (wzrost emisji) powoduje, że adsorpcja fizyczna na powierzchni – już sadzy wtórnej – jest znacznie ograniczona. Ograniczenie to jest natury ilościowej, mniejsza ilość adsorbenta (sadzy wtórnej) i substancji adsorbowanych, a także jakościowej – choćby z racji ograniczenia cyklizacji związków poliacetylenowych, które po odwodornieniu przyjmują postaci wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych i ciężkich węglowodorów. Prawdopodobnie wyższe temperatury obiegu uniemożliwiają „krzepnięcie” fazy ciekłej i wcześniej uwalniają fazę gazową HC, a aktywny tlen ma właściwości umożliwiające utlenianie węglowodorów nie tylko w masie spalin, ale także w masie samych cząstek stałych.



Rys. 4. Charakterystyka badanego silnika zasilanego olejem napędowym (ON) i paliwem DEP 100 (czysty depolimer)

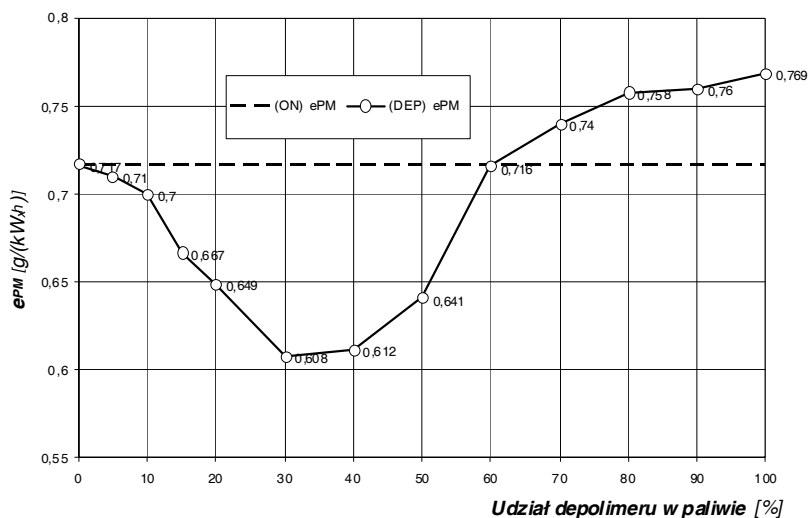


Rys. 5. Charakterystyki badanego silnika zasilanego olejem napędowym (ON) i komponentami paliw z różnym udziałem procentowym depolimeru (DEP 20, 50, 100)

Przeprowadzone badania wykazały, że większy niż 60% udział depolimeru w paliwie powoduje wzrost emisji cząstek stałych (rys. 6), osiągając 7-procentowy wzrost emisji dla czystego depolimeru (DEP100). Prawdopodobną przyczyną tego wzrostu emisji jest rosnący udział w procesie spalania większej ilości paliwa o mniejszej gęstości przewyższający korzystny wpływ braku siarki w paliwie (eliminującego frakcję *INSOL* cząstek stałych), ograniczający emisję cząstek w porównaniu z olejem napędowym.

W zestawieniu poniżej (tabela 2) zaprezentowano zmiany emisji (w odniesieniu do oleju napędowego, gdzie: „+” – oznacza wzrost, a „-”, – zmniejszenie emisji) dla wybranych „charakterystycznych” paliw depolimerowych, a na rys. 7 przedstawiono porównanie emisji silnika zasilanego paliwem z różnym udziałem procentowym depolimeru.

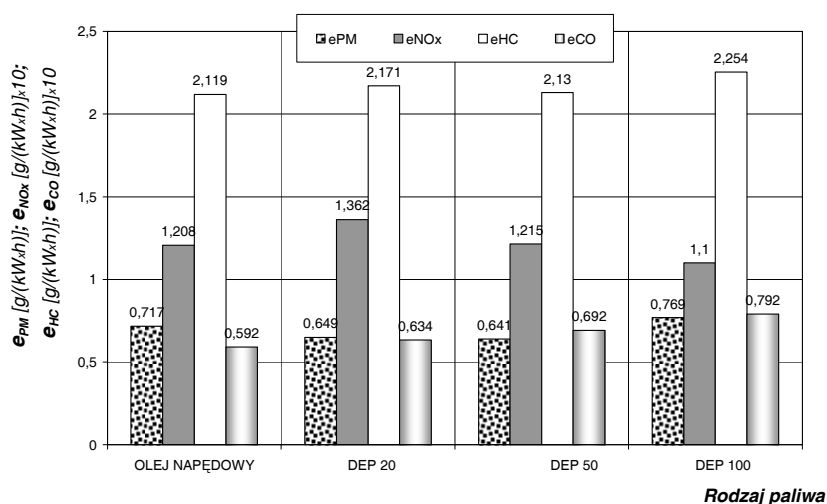




Rys. 6. Zmiany emisji cząstek stałych wywołane zmianą udziału procentowego depolimeru w mieszaninie paliwowej z olejem napędowym

Tabela 2. Zmiany emisji silnika zasilanego paliwami depolimerowymi

	PM [g/(kW·h)]	HC [g/(kW·h)]	CO g/(kW·h)	NO <sub>x</sub> [g/(kW·h)]
ON	0,717	2,119	5,92	12,08
DEP20	- 10%	+ 3%	+ 7%	+ 13%
DEP50	- 11%	+ 2%	+ 17%	+ 1%
DEP100	+ 7%	+ 6%	+ 34%	- 9%



Rys. 7. Wyniki badań porównawczych emisji silnika zasilanego olejem napędowym i komponentami paliw z różnym udziałem procentowym depolimeru (DEP 20, 50, 100)

## Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań silnikowych można stwierdzić, że najlepsze parametry eksploatacyjne wykazuje paliwo z 20% dodatkiem depolimeru (DEP 20), dla którego zaobserwowano wzrost mocy i momentu oraz sprawności ogólnej silnika w zakresie małych i średnich obciążeń.

Większy niż 50% udział depolimeru w mieszaninie z olejem napędowym powoduje już wyraźne pogorszenie warunków pracy silnika i jego osiągow (spadek mocy, momentu i sprawności na poziomie 20%).

Główną zaletą stosowania depolimeru jako komponentu paliwowego jest zmniejszenie emisji cząstek stałych w spalinach silnika. Emisja pozostałych toksycznych składników spalin wykazuje niewielką tendencję wzrostu w porównaniu z emisją przy zasilaniu paliwem standardowym.

Z prezentowanego materiału badawczego wynika, że ze względu na emisję cząstek stałych największe 15% efekty w zmniejszeniu tej emisji można uzyskać dla mieszanek paliwowych zawierających 30–40% depolimeru. Główną przyczyną mniejszej emisji jest eliminacja siarczanowej części frakcji *INSOL* cząstek (a tym samym redukcja całkowitej ilości masy cząstek), ponieważ paliwo depolimerowe nie zawiera w swoim składzie pierwiastkowym siarki.

Większy niż 60% udział depolimeru w paliwie powoduje wzrost emisji cząstek stałych, osiągając 7-procentowy wzrost emisji dla czystego depolimeru (DEP100). Prawdopodobną przyczyną tego wzrostu emisji jest rosnący udział w procesie spalania większej ilości paliwa o mniejszej gęstości przewyższający korzystny wpływ braku siarki w paliwie (eliminującego frakcję *INSOL* cząstek stałych), zmniejszający poziom emisji cząstek w porównaniu do oleju napędowego.

## Bibliografia

1. Baczewski K., Kołduński T.: Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym. WKiŁ 2004.
2. Budzyńska-Józwiak A., Sosnowska-Maciukiewicz L., Szumacher S.: Badania nad hydorafinacją frakcji węglowodorowej z destrukcyjnej przeróbki odpadowych tworzyw sztucznych. Problemy Eksploatacji, 4/2008.
3. Darkowski A.: Katalityczny kraking odpadowych poliolefin na katalizatorach zeolitowych do paliw silnikowych, Materiały XIII Forum Zeolitowego, Polańczyk 2006.
4. Darkowski A., Swat M.: Catalytic cracking of polyolefines waste to diesel oil and gasoline, Problemy Eksploatacji 4/2006.
5. Koder Y., Ishihara Y.: Novel process for recycling waste plastics to fuel gas using a moving-bed reactor. Energy & Fuels 20 2006.

6. Łuksa A., Sobczak M., Gos M., Wojcieszak P., Krzemińska M., Stępień A., Dębek C.: Wykorzystanie ciekłych frakcji z termodestrukcji odpadów polimerowych jako komponentów paliw węglowodorowych. *Przem. Chem.* 87 2008.
7. Sarbak Z.: *Kataliza w ochronie środowiska.* 2004.
8. Tymiński B., Zwoliński K., Darkowski A., Jurczyk R.: Wpływ katalizatora na szybkość rozkładu polietylenu i jakość otrzymanych produktów. *Paliwa z odpadów, praca zbiorowa pod red. J. Wandrasza i K. Pikonia.* 2005.
9. Walendziewski J.: *Fuel Process. Technol.* 2005.
10. Zabłocki M.: *Wtrysk i spalanie paliwa w silnikach wysokoprężnych.* WKiŁ 1976.
11. Polska Norma, *Paliwa do pojazdów samochodowych, oleje napędowe,* PN-EN 590.

Recenzent:  
**Zdzisław CHŁOPEK**

## **A depolymer application as a fuel to the diesel engine**

### **Key-words**

Motor fuels, Diesel engine, environmental protection.

### **Summary**

Research results of depolymer application as a fuel to the Diesel engine was presented.

The fuel with the 20% depolymer additive resulted in the best operational performance of the engine. The increase power and torque and the overall efficiency of the engine for small and medium-load engines were observed.

The effects of this fuel supply on the emission of toxic substances in comparison to the emission of the standard fuel supply were presented.

