

Jerzy Stobiecki, Milena Górską

Wpływ eteru dietylowego w mieszaninie z olejem rzepakowym na emisję limitowanych składników spalin silnika AVL

JEL: R41 DOI: 10.24136/atest.2019.252

Data zgłoszenia: 28.01.2020 Data akceptacji: 10.02.2020

W artykule opisano wyniki badań dotyczące emisji limitowanych składników spalin z jednocylindrowego, badawczego silnika firmy AVL serii 5402 zasilanego mieszaninami oleju rzepakowego i eteru dietylowego. W badaniach wykorzystano olej rzepakowy do którego dodano 10, 20, 30 i 40 % objętościowo eteru dietylowego. Oceniono właściwości fizykochemiczne przygotowanych mieszanin paliwowych i ich wpływ na emisję limitowanych składników spalin, a w szczególności cząstek stałych, tlenków azotu oraz niespalonych węglowodorów. Stwierdzono, że dodatek DEE do oleju rzepakowego sprzyja zmniejszeniu emisji szkodliwych składników spalin do otoczenia, a w szczególności cząstek sadzy oraz niespalonych węglowodorów. Eter dietylowy dodany do oleju rzepakowego nie ma istotnego znaczenia na zmianę emisji tlenków azotu. Wskazany problem stanowi barierę typową dla procesu spalania paliwa i w niewielkim stopniu jest zależny od jego rodzaju. Mając to na uwadze należy stwierdzić, że ograniczenie emisji NOx do otoczenia wymaga zmiany spalania paliwa w kierunku realizacji tzw. procesu niskotemperaturowego. W konwencjonalnych systemach spalania redukcja emisji NOx w dalszym ciągu będzie wymagała stosowania dodatkowych układów oczyszczających jak np. SCR tj. selektywna redukcja katalityczna.

Słowa kluczowe: tlenek azotu, sadza, silnik spalinowy, biopaliwa, olej rzepakowy, eter dietylowy.

Wstęp

Rozwój pojazdów determinowany jest regulacjami prawnymi w zakresie emisji tzw. limitowanych składników spalin. Oznacza to, że na rynku promowane są takie rozwiązania technologiczne, które sprzyjają ograniczeniu emisji szkodliwych składników spalin do otoczenia. Wprowadzanie kolejnych ograniczeń w tym zakresie, znanych pod hasłem normy EURO/Euro powoduje, że producenci pojazdów są zmuszeni do rozwijania kosztownych technologii oczyszczania spalin jak np. reaktory katalityczne, filtry cząstek stałych, selektywna redukcja katalityczna itp. W tym aspekcie równie ważne są zmiany w zakresie właściwości fizykochemicznych paliw spalanych w silnikach. Z tego powodu dąży się m.in. do tego, aby paliwa nie zawierały siarki oraz ołowiu. W przypadku olejów napędowych stosowane są biododatki poprawiające smarność oraz liczbę cetanową. Rozwijane są nowe rodzaje paliw, których spalanie jest źródłem mniejszego zanieczyszczenia powietrza. W tym zakresie ważną rolę odgrywają alkohole (etanol oraz metanol), LPG (gaz propan – butan), CNG (sprężony gaz ziemny) oraz LNG (skroplony gaz ziemny). Przedmiotem zainteresowania są również wybrane etery jak np. etylo tert-butylowy (EETB), dimetylowy (DME) oraz dietylowy (DEE) [1-3]. Cząsteczki eterów w porównaniu z alkoholami nie są polarne, co oznacza że łatwo mieszają się zarówno z benzyną oraz olejem napędowym jak również z olejami roślinnymi. Tego rodzaju mieszaniny są stabilne i nie ulegają rozwarstwieniu np. pod wpływem zmian temperatury [4]. Było to jedną z inspiracji dla podjęcia odpowiednich badań z zakresu wykorzystania eterów

jako komponentu mieszaniny paliwowej z olejami pochodzenia roślinnego do zasilania silników o zapłonie samoczynnym.

1. Olej rzepakowy jako paliwo silnikowe

Historia paliw roślinnych rozpoczęła się w XIX wieku. Właśnie wtedy, Rudolf Diesel pracując nad swoim pierwszym silnikiem o zapłonie samoczynnym przystosował go do zasilania olejem pochodzenia roślinnego. Warto zwrócić uwagę, że w tamtych czasach bardzo popularne były pojazdy elektryczne. Jednak mniejsze koszty zakupu i eksploatacji pojazdów napędzanych silnikami spalinowymi spowodowały, że aż do dzisiaj stanowią one znaczącą część rynku. Początkowo był on zdominowany przez silniki napędzane benzyną oraz olejem napędowym. Natomiast w okresach kryzysu ekonomicznego oraz konfliktów zbrojnych prowadzonych w globalnej skali poszukiwano rozwiązań alternatywnych, które polegały na zastosowaniu na cele paliwowe olejów roślinnych, alkoholi oraz syntetycznej benzyny uzyskiwanej z węgla. Ten ostatni przykład jest znany jako synteza Fischera-Tropscha. Zakres obecnego wykorzystania wskazanych paliw jest uzależniony przede wszystkim aspektami ekonomicznymi. Jednak w coraz szerszym zakresie równie ważne stają się aspekty środowiskowe, co oznacza że użytkownicy pojazdów mogą ponosić dodatkowe koszty eksploatacji pojazdów pod warunkiem, że są one bardziej przyjazne środowisku naturalnemu. Biorąc to pod uwagę opracowano technologię produkcji biopaliwa, które po spełnieniu normy EN14214 może stanowić samoistne paliwo do silników o zapłonie samoczynnym. Tego rodzaju paliwa charakteryzują się bardzo dobrą smarnością, ale jednocześnie są bardziej podatne na utlenienie, co prowadzi do niekorzystnych zmian ich właściwości fizykochemicznych [5-7]. W związku z tym zaleca się, aby biopaliwa były zużyte w okresie ok. 2-3 miesięcy od daty wyprodukowania. Warto zauważyć, że współczesne biopaliwa uzyskiwane są w procesie transestryfikacji. Dzięki tej technologii każdy olej roślinny może zostać przetworzony do postaci paliwa o właściwościach fizykochemicznych, które będą odpowiednie dla silników o zapłonie samoczynnym. Oleje roślinne nie są odpowiednim paliwem dla tego rodzaju silników z uwagi na znaczną lepkość. Jest ona ok. 10 krotnie większa w stosunku do lepkości standardowego oleju napędowego. Proces estryfikacji pozwala znacząco zredukować tę lepkość biopaliwa, które staje się bardziej przydatne do zasilania silników o zapłonie samoczynnym. Należy zauważyć, że proces technologiczny transestryfikacji jest kosztowny i wymaga dostarczenia energii elektrycznej do reaktora w celu podgrzania wkładu paliwowego i jego mieszania. Produktem końcowym procesu jest m.in. biopaliwo oraz gliceryna. Proces technologiczny wytwarzania tego rodzaju biopaliwa jest trudny do kontroli i zależny od parametrów zastosowanego oleju roślinnego. Tymczasem zmieniają się one w zależności od gatunku rośliny oleistej, warunków glebowych, nasłonecznienia i innych czynników determinujących warunki uprawne. Mając na uwadze wskazane problemy zaproponowano, aby uzyskać odpowiednie biopaliwo poprzez mieszanie oleju roślinnego z dodatkiem zmniejszającym gęstość i lepkość. Takim dodatkiem jest eter dietylowy. Na podstawie analizy literaturowej można stwierdzić, że charakteryzuje się on bardzo dużą liczbą cetanową, co jest korzystne w kontekście jego zastoso-

wania jako paliwo do silników o zapłonie samoczynnym [2, 8-9]. Stwierdzono również, że ma on znaczący wpływ nie tylko na zmniejszenie gęstości i lepkości oleju roślinnego, ale również jego napięcia powierzchniowego, co poprawia jakość rozpylenia mieszaniny paliwowej. Biorąc pod uwagę analizę literaturową z zakresu przedmiotu niniejszego artykułu można stwierdzić, że dotychczas problem zastosowania DEE jako komponentu mieszaniny z olejem roślinnym na cele paliwowe nie był przedmiotem szerokiego zainteresowania. Znacznie więcej miejsca poświęcono wykorzystaniu DEE jako dodatku do oleju napędowego oraz biopaliwa (FAME – Fatty Acid Methyl Ester). W tym aspekcie autorzy licznych publikacji wskazywali na szereg korzyści wynikających z zastosowania DEE jako komponentu mieszaniny paliwowej. Na tym tle wiedza o korzyściach wynikających z wykorzystania eteru dietylowego w mieszaninie z olejami roślinnymi jest znacznie węższa. Mając to na uwadze postanowiono przeprowadzić odpowiednie badania z wykorzystaniem do tego celu nowoczesnego sprzętu badawczego firmy AVL.

2. Metody i materiały

2.1. Charakterystyka badanych paliw

W badaniach wykorzystano jadalny olej rzepakowy oraz eter dietylowy o czystości laboratoryjnej. Podstawowe właściwości fizykochemiczne wszystkich badanych paliw przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Wybrane właściwości fizykochemiczne badanych paliw

Parametr	Wartość				
	OR	OR10	OR20	OR30	OR40
Wartość opałowa, MJ/kg	37	36	36	36	36
Gęstość w 15 °C, kg/m ³	921	904	882	873	851
Lepkość kinematyczna w 40 °C, mm ² /s	34	17	11	7	4
Napięcie powierzchniowe, mN/m	46	41	37	31	27
Temperatura zapłonu, °C	>300	21	-3	-13	-22

Na podstawie oceny danych przedstawionych w tabeli 1 można stwierdzić, że wartość opałowa oleju rzepakowego jest porównywalna z eterem dietylowym. Z tego powodu wszystkie testowane mieszaniny paliwowe charakteryzowały się porównywalną wartością opałową. Zauważono, że dodatek DEE do OR ma korzystny wpływ na zmniejszenie gęstości i lepkości OR. Dzięki temu proces rozpylenia oleju rzepakowego powinien być odpowiednio korzystniejszy przy każdorazowym zwiększeniu stężenia DEE w mieszaninie paliwowej. Jest to dodatkowo wsparte zmniejszeniem napięcia powierzchniowego badanych mieszanin, do których dodano eter dietylowy. Zauważono jednak, że dodatek tego eteru powoduje gwałtowne zmniejszenie temperatury zapłonu. Oznacza to, że badane mieszaniny są bardziej podatne na zapłon i dlatego zasady bezpieczeństwa związane z ich transportem i przechowywaniem muszą być porównywalne do tych, które obowiązują przy stosowaniu benzyn silnikowych.

2.2. Opis stanowiska badawczego i procedury testowej

Niezbędne badania silnikowe wykonano w laboratorium silnikowym Katedry Pojazdów Samochodowych UTH Radom. Przedmiotem badań był jednocylindrowy silnik o zapłonie samoczynnym firmy AVL serii 5402. Silnik został wyposażony w system wtrysku paliwa Common Rail (CR) opracowany przez firmę BOSCH. Schemat stanowiska badawczego pokazano na rysunku 2.

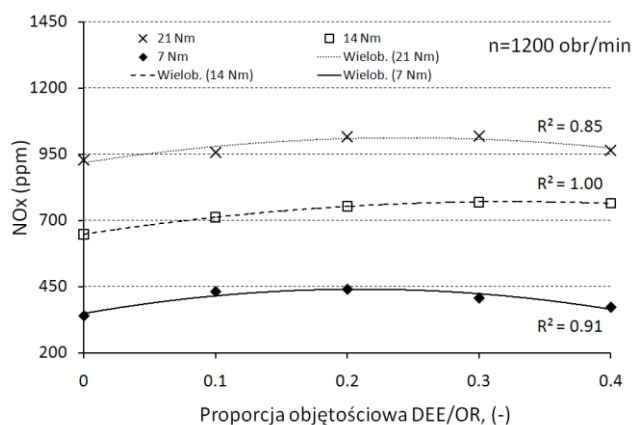


Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego wyposażonego w silnik AVL serii 5402

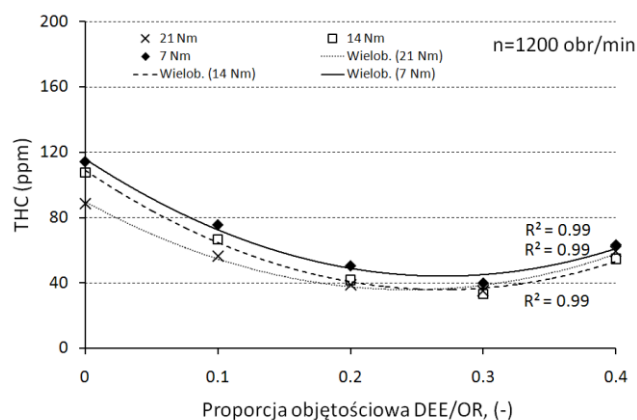
Testowany silnik firmy AVL badano w warunkach ustalonych dla trzech prędkości obrotowych wału korbowego $n = 1200, 2200$ i 3200 obr/min oraz trzech obciążeń tj. $M = 7, 14$ i 21 Nm. Takie warunki odzworowują możliwe stany pracy testowanego silnika tj. jego małe, średnie i duże obciążenia. Badany silnik ma możliwość zmiany konfiguracji w zakresie możliwości uwzględnienia w badaniach recyrkulacji spalin oraz zastosowania doładowania. Na potrzeby niniejszego testu silnik skonfigurowano w taki sposób, aby nie wykorzystywał tych systemów. Dzięki temu w zaplanowanym eksperymencie ograniczono liczbę zmiennych niezależnych. Z tego samego powodu w czasie badań zachowano te same, niezmiennie wartości kąta wyprzedzenia wtrysku dawki pilotującej oraz głównej paliwa do komory spalania. Przed przystąpieniem do pomiaru określonych parametrów pracy silnika w poszczególnych punktach pomiarowych określonych ww. parą (n, M) zadbano o to, aby silnik uzyskał stabilizację temperaturową. Po jej uzyskaniu dokonywano pomiaru parametrów cyklu roboczego silnika zasilanego określonym rodzajem paliwa. W szczególności rejestrowano zużycie paliwa, zmiany ciśnienia w komorze spalania, stężenie sadzy, tlenków azotu, niespalonych węglowodorów, tlenu azotu i wielu innych związków chemicznych powstających w procesie spalania paliwa węglowodorowego. Niezbędne pomiary limitowanych składników spalin wykonano przy pomocy urządzenia AVL Micro Soot Sensor oraz spektrometru i60FT.

3. Rezultaty

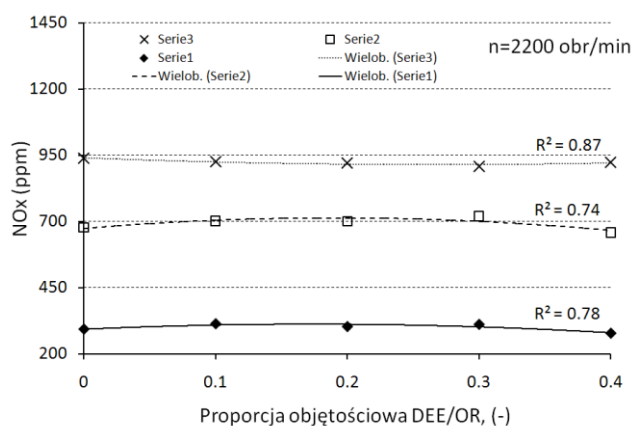
Na rysunkach 2-4 pokazano wpływ zawartości DEE w mieszaninie z OR na stężenie w spalinach tlenków azotu z silnika AVL serii 5402. Dla uzyskanych wyników pomiarowych dobrano krzywą regresji wielomianowej drugiego stopnia. Uzyskane, wysokie wartości wskaźnika determinacji R^2 wyznaczone dla dobranych krzywych regresji potwierdzają dobre bardzo dobre dopasowanie modelu do danych pomiarowych. Na podstawie analizy rysunków 2 – 4 można stwierdzić, że skład badanych mieszanin paliwowych miał niewielki wpływ na stężenie NO_x w spalinach badanego silnika. Oznacza to, że sposobów zmniejszenia emisji tego limitowanego składnika spalin należy poszukiwać przy zastosowaniu innych technologii. Uzyskane rezultaty wskazują, że zastosowany konwencjonalny system spalania nie pozwala uzyskać zmniejszenia emisji NO_x na skutek zastosowania różnych proporcji badanych mieszanin paliwowych.



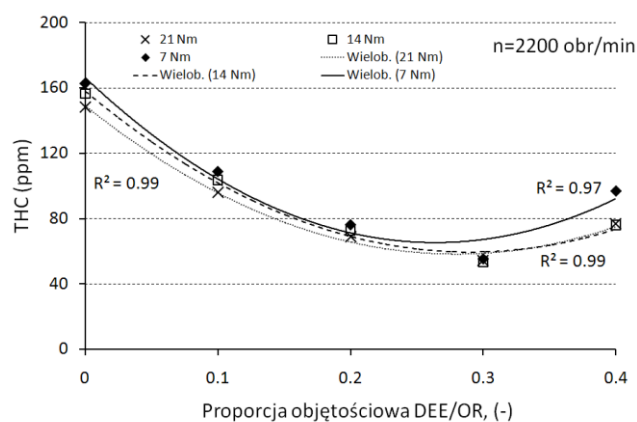
Rys. 2. Wpływ stężenia DEE w mieszaninie z OR na emisję NOx z silnika AVL pracującego z obciążeniem 7, 14 i 21 Nm przy prędkości obrotowej wału korbowego n = 1200 obr/min



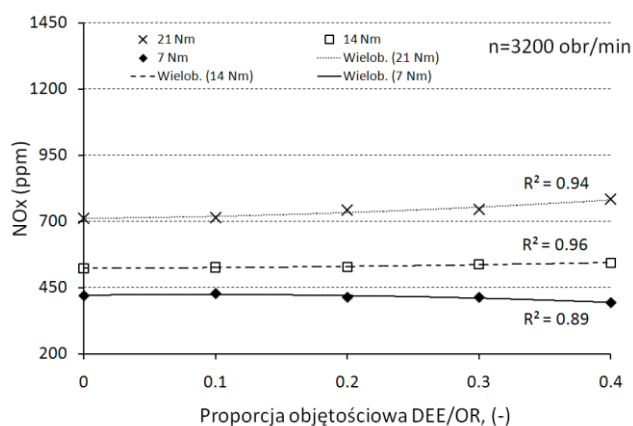
Rys. 5. Wpływ stężenia DEE w mieszaninie z OR na emisję THC z silnika AVL pracującego z obciążeniem 7, 14 i 21 Nm przy prędkości obrotowej wału korbowego n = 1200 obr/min



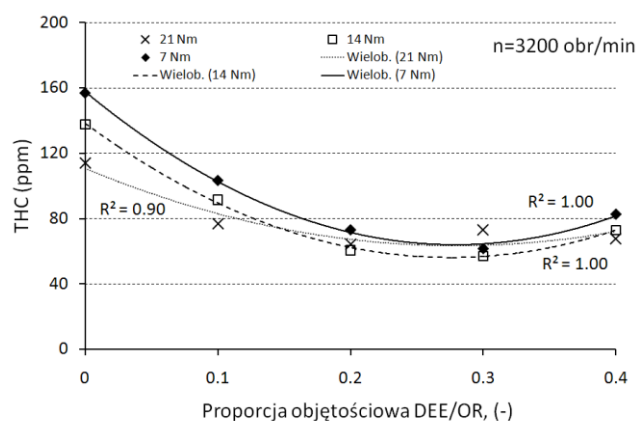
Rys. 3. Wpływ stężenia DEE w mieszaninie z OR na emisję NOx z silnika AVL pracującego z obciążeniem 7, 14 i 21 Nm przy prędkości obrotowej wału korbowego n = 2200 obr/min



Rys. 6. Wpływ stężenia DEE w mieszaninie z OR na emisję THC z silnika AVL pracującego z obciążeniem 7, 14 i 21 Nm przy prędkości obrotowej wału korbowego n = 2200 obr/min



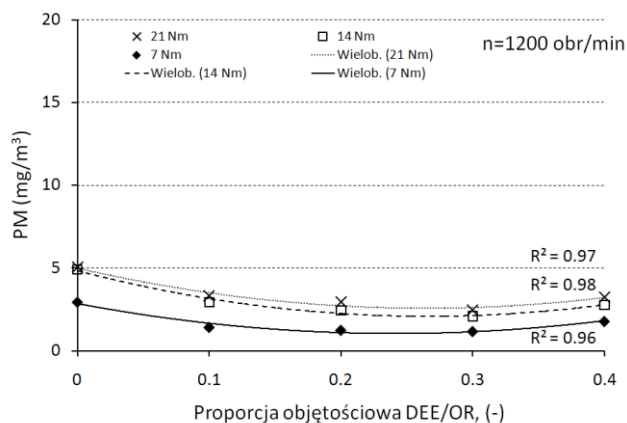
Rys. 4. Wpływ stężenia DEE w mieszaninie z OR na emisję NOx z silnika AVL pracującego z obciążeniem 7, 14 i 21 Nm przy prędkości obrotowej wału korbowego n = 3200 obr/min



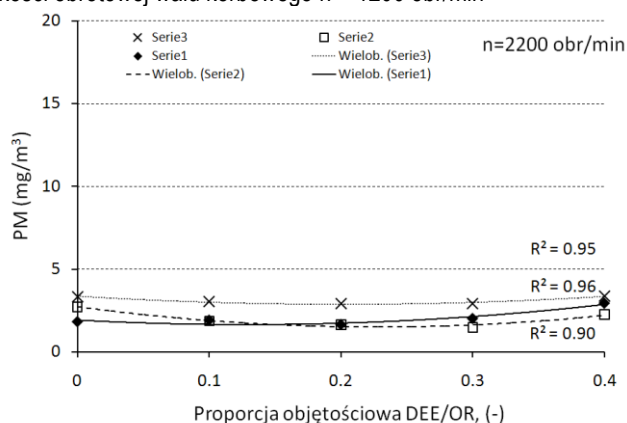
Rys. 7. Wpływ stężenia DEE w mieszaninie z OR na emisję THC z silnika AVL pracującego z obciążeniem 7, 14 i 21 Nm przy prędkości obrotowej wału korbowego n = 3200 obr/min

Na rysunkach 5-7 pokazano jak zmiana stężenia DEE w OR wpływa na zmianę emisji niespalonych węglowodorów (THC – Total hydrocarbon) do otoczenia. Również w tym przypadku uzyskano bardzo dobre dopasowanie modelu regresji wielomianowej drugiego stopnia do danych pomiarowych. Rezultaty czytelnie potwierdzają, że dodatek DEE do OR ma ważny wpływ na zmniejszenie stężenia THC w spalinach badanego silnika. Zauważono, że największą redukcję zanieczyszczenia można uzyskać dla mieszanin zawierających 20 do 30 % DEE w OR.

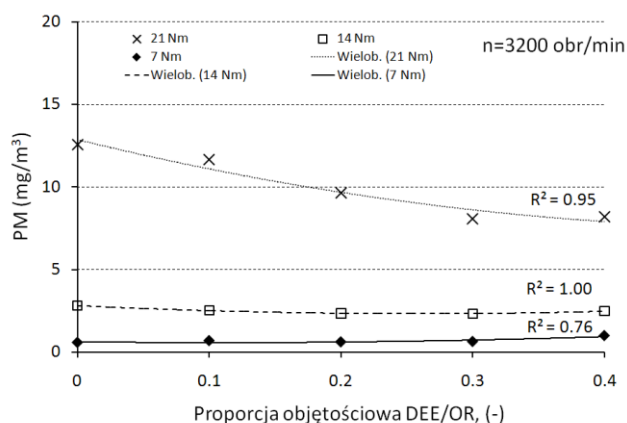
Ocenę emisji cząstek sadzy (PM) do otoczenia z badanego silnika przedstawiono na rysunkach 8 – 10. Na podstawie analizy tych rysunków można potwierdzić, że otrzymane zależności są bardzo dobrze odwzorowane przy pomocy regresji wielomianowej drugiego stopnia. Stwierdzono, że emisja PM jest najniższa dla mieszanin paliwowych zawierających od 20 do 30 % DEE w mieszaninie z OR.



Rys. 8. Wpływ stężenia DEE w mieszaninie z OR na emisję PM z silnika AVL pracującego z obciążeniem 7, 14 i 21 Nm przy prędkości obrotowej wału korbowego $n = 1200$ obr/min



Rys. 9. Wpływ stężenia DEE w mieszaninie z OR na emisję PM z silnika AVL pracującego z obciążeniem 7, 14 i 21 Nm przy prędkości obrotowej wału korbowego $n = 2200$ obr/min



Rys. 10. Wpływ stężenia DEE w mieszaninie z OR na emisję PM z silnika AVL pracującego z obciążeniem 7, 14 i 21 Nm przy prędkości obrotowej wału korbowego $n = 3200$ obr/min

Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań z zakresu wpływu eteru dietylowego dodawanego do oleju rzepakowego na emisję limitowanych składników spalin z silnika o zapłonie samoczynnym. Odpowiednie testy wykonano na badawczym silniku firmy AVL, który wyposażono w nowoczesne systemy pomiarowe m.in. spektrometr do analizy składu gazów spalinowych, czujnik cząstek sadzy, system rejestracji zmian ciśnienia w komorze spalania oraz zużycia paliwa przez silnik.

Na podstawie przeprowadzonych testów można stwierdzić, że DEE jest odnawialnym dodatkiem paliwowym, który pozwala efektywnie poprawić właściwości fizykochemiczne oleju rzepakowego jako paliwa do silników o zapłonie samoczynnym. DEE zmniejsza gęstość, lepkość oraz napięcie powierzchniowe oleju rzepakowego, co poprawia jakość jego rozpylenia do komory spalania. Ma to następnie wpływ na jakość procesu spalania i otrzymane produkty końcowe. Uzyskane rezultaty potwierdziły, że DEE dodawany do OR w stężeniu 20 – 30 % (v/v) ma najkorzystniejszy wpływ na zmniejszenie stężenia THC i PM w spalinach. Jednocześnie zauważono że badane mieszaniny paliwowe nie miały wpływu na zmianę stężenia NOx. Bariera dla redukcji tego składnika jest zastosowana technologia spalania, a nie rodzaj paliwa. Wynika to z tego, że spalanie każdego paliwa w systemie CR skutkuje wytworzeniem w komorze spalania wysokiej temperatury, co ma bezpośrednie przełożenie na wysoką emisję NOx.

Bibliografia:

1. Baczewski K., Kałdoński T., Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 2004.
2. Bailey B., Eberhardt J., Goguen S., Erwin J., Diethyl Ether (DEE) as a Renewable Diesel Fuel, SAE Technical Paper 972978, 1997,
3. Chłopek Z., Paliwa alternatywne do silników spalinowych a emisja dwutlenku węgla. Wydawnictwo ITS, Transport Samochodowy 2010, z. 2.
4. Zhang, N., Huang, Z., Wang X., Zheng B., A Comparative Study of Two Kinds of Biodiesels and Biodiesel-DEE Blends In a Common Rail Diesel Engine. SAE Internationa 2011
5. Merkisz J., Pielecha I., Alternatywne napędy pojazdów. Sidibé Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2006.
6. S.S., Blin J., Vaitilingom G., Azoumah Y., Use of crude filtered vegetable oil as a fuel in Diesel engines state of the art: literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2010;14:2748-2
7. Rakopoulos D.C., Rakopoulos C.D., Giakoumis E.G., Dimaratos A.M., Founti M.A., Comparative environmental behaviour of bus engine operating on blends of diesel fuel with four straight vegetable oils of Greek origin: Sunflower, cottonseed, corn and olive. Fuel, 2011;90(11); 3439-3446
8. Purushothaman K., Nagarajan G., Experimental investigation on a C.I. engine using orange oil and orange oil with DEE. Fuel, 2009.
9. Imtenan S., Varman M., Masjuki H.H., Kalam A.M., Sajjad H., Arbab M.I. Effect of DEE as an Oxygenated Additive on Palm Biodiesel-Diesel Blend In the Context of Combustion and Emission Characteristics on a Medium Duty Diesel Engine. DOI:10.7763/IPCBE. 2015. V85. 16.

Impact of diethyl ether in blend with rapeseed oil on emission of limited exhaust components of the AVL engine

The paper describes the results of research on the emission of limited exhaust components from a single-cylinder, research engine of the AVL series 5402 powered by mixtures of rapeseed oil and diethyl ether. Rapeseed oil was used in the research, to which 10, 20, 30 and 40% by volume of diethyl ether was added. The physicochemical properties of the prepared fuel mixtures and their impact on the emission of limited exhaust components, in particular particulates, nitrogen oxides and unburned hydrocarbons, were evaluated. It was found that the addition of DEE to rapeseed oil helps to reduce the emission of harmful exhaust components to the environment, in

particular soot particles and unburned hydrocarbons. Diethyl ether added to rapeseed oil has no significant effect on changing the emission of nitrogen oxides. The indicated problem is a barrier typical of the fuel combustion process and is slightly dependent on its type. With this in mind, it should be noted that reducing NOx emissions to the environment requires a change in fuel combustion towards the implementation of the so-called low temperature process. In conventional combustion systems, the reduction of NOx emissions will still require the use of additional treatment systems such as SCR, i.e. selective catalytic reduction

Keywords: nitrogen oxides, soot, combustion engine, biofuels, rapeseed oil, diethyl ether.

Autorzy:

mgr inż. Jerzy Stobiecki – Uniwersytet Technologiczno – Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu. Wydział Mechaniczny

Milena Górską – Uniwersytet Technologiczno – Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu. Wydział Inżynierii Chemicznej i Towaroznawstwa