

Wiesław PIEKARSKI
Jacek WAWRZOSEK

WPLYW ZAWARTOŚCI ESTRU OLEJU RZEPAKOWEGO W MIESZANCE PALIWOWEJ NA POZIOM EMISJI WĘGLOWODORÓW

An influence of rape oil ester content in fuel blend on hydrocarbon emission levels

Wstęp

Olbrzymim zagrożeniem dla środowiska naturalnego są związki toksyczne zawarte w emitowanych spalinach obecnie użytkowanych pojazdów (70-80% ogólnych zanieczyszczeń w miastach). Do toksycznych składników spalin zanieczyszczających środowisko należy zaliczyć między innymi: tlenek węgla CO, węglowodory C_nH_m , tlenki azotu NO_x , tlenki siarki SO_x , cząstki stałe PM (ang. particulate matter), sadza z osadzonymi na niej węglowodorami, szczególnie z grupy PAH i cząsteczkami kwasu siarkowego, dwutlenek węgla CO_2 , pyły zawieszinowe itp.. Ciągły wzrost emisji spalin powoduje degradację środowiska przyrodniczego poprzez wzrost emisji CO_2 , CH_4 , podejrzewanych o wywoływanie efektu cieplarnianego.

Problem badawczy powstał między innymi z szeregu ograniczeń wynikających z wprowadzania norm europejskich. Ograniczenie ogólnej emisji spalin, a szczególnie zmniejszenie zawartości składników toksycznych spalin, dotyczy całego społeczeństwa. Ważna jest tu mobilizacja do tego celu zarówno producentów pojazdów, jak i ich użytkowników. Należy zaznaczyć, że najskuteczniejszą metodą zmniejszania emisji szkodliwych składników spalin, wydzielanych przez pojazdy, wydaje się ograniczanie ich powstawania przez właściwy dobór paliwa (spalane są głównie paliwa ropopochodne). Stąd dużą nadzieję wiąże się z wykorzystaniem zamienników paliw konwencjonalnych, tzn. biopaliw, do zasilania silników.

Nowa polityka rolna państw europejskich zmierza do wykorzystania nie przeznaczonych do konsumpcji nadwyżek produkcyjnych rolnictwa, głównie tłuszczów roślinnych, jako składników biopaliw.

Jak dalej w pracy przedstawiono, poziom emisji węglowodorów C_nH_m w spalinach silników S-4002 zasilanych mieszankami paliwowymi mineralnego

Prof. dr hab. inż. **Wiesław Piekarski**, Katedra Pojazdów i Silników, dr **Jacek Wawrzosek**
Katedra Zastosowań Matematyki Akademii Rolniczej w Lublinie.

oleju napędowego ON z dodatkiem estru oleju rzepakowego RME zmniejsza się o stałą wielkość, wynikającą z wielkości tego dodatku. Natomiast wzrasta wraz ze spadkiem mocy silnika i zależy od rozwijanej przez silnik prędkości obrotowej.

Cel i zakres pracy

Celem pracy jest statystyczne porównanie poziomu sumarycznej ilości niespalonych węglowodorów C_nH_m w emitowanych spalinach wydzielanych przez silnik S-4002 zasilany mieszankami paliwowymi, składającymi się z mineralnego oleju napędowego ON i estru oleju rzepakowego RME, zestawionych w sześciu różnych proporcjach.

Badania obejmowały pomiar parametrów energetycznych i ekologicznych, dotyczących wskaźników pracy i składników spalin silnika S-4002 zasilanego RME i jego mieszaninami z olejem napędowym (ON). Pomiar składników spalin realizowano podczas sporządzania charakterystyki obciążeniowej przy prędkościach momentu maksymalnego $n_{M_{omax}}$ (1600 obr/min) i mocy maksymalnej $n_{N_{emax}}$ (2000 obr/min). W niniejszych badaniach wykorzystano sześć rodzajów mieszanin RME i ON, zawierających odpowiednio: 0, 20, 40, 60, 80, 100% RME, zaś pomiary wykonywano dla dziesięciu poziomów obciążeń silnika (2-32 kW).

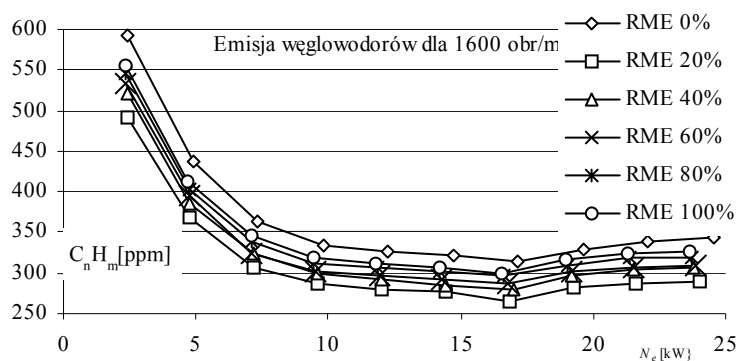
Do opracowania statystycznego zebranych wyników pomiarów posłużono się analizą kowariancji. Niezbędnych obliczeń dokonano z wykorzystaniem programu *Excel 2000*.

Zastosowanie kilku modeli analizy kowariancji w klasyfikacji pojedynczej

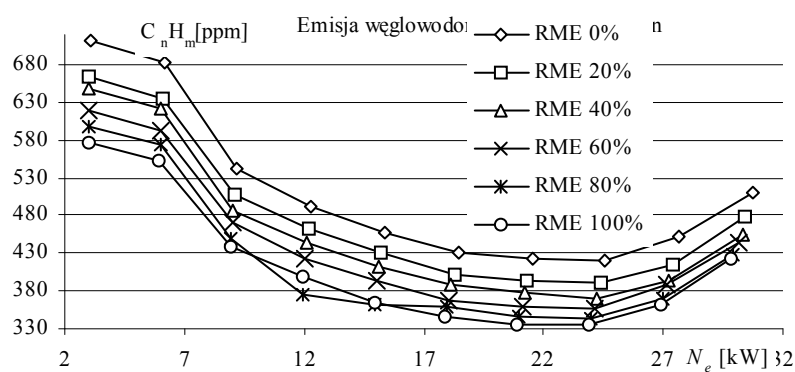
Zauważmy, że poziom emisji węglowodorów zależy od dwu zmiennych: rozwijanej mocy N_e [kW] oraz procentowego udziału RME w mieszance RME i ON. Tę statystyczną zależność C_nH_m od N_e oraz RME przedstawiają na rys. 1 (oraz odpowiednio na rys. 2) punkty uzyskane z 60 pomiarów przy prędkości 1600 obr/min (i 60 pomiarów przy prędkości odpowiednio 2000 obr/min). RME w legendzie rysunków oznacza zmienną określającą udział estru oleju rzepakowego w paliwie.

Z analizy rysunków 1 i 2 wynika, że występuje wyraźna zależność między poziomem sumarycznej ilości niespalonych węglowodorów C_nH_m w emitowanych spalinach i mocą efektywną N_e , dlatego też znaczna część zmienności C_nH_m jest wyjaśniona przez zmienną N_e . Z tego względu dla zbadania statystycznego wpływu zawartości estru RME w paliwie na poziom węglowodorów zdecydowano się na wykorzystanie metody statystycznej, zwanej analizą

kowariancji. W modelu tym zmienną niezależną (grupującą) jest udział procentowy RME w paliwie, zmienną zależną – poziom węglowodorów, zaś zmienną towarzyszącą – moc efektywna N_e [1]. Ta analiza pozwala usunąć znane źródło zmienności (N_e), tak aby uwidocznić wpływ czynnika (RME) na zmienną zależną C_nH_m .



Rys. 1. Zależność poziomu emisji C_nH_m od mocy przy 1600 obr/min



Rys. 2. Zależność poziomu emisji C_nH_m od mocy przy 2000 obr/min

Wstępna analiza statystyczna wykazała, że w analizie kowariancji należy uwzględnić zmienną towarzyszącą N_e wraz z jej kwadratem N_e^2 i sześcianem N_e^3 . Budowa właściwego modelu analizy kowariancji w klasyfikacji pojedynczej wymaga, aby oddzielnie dla prędkości obrotowej 1600 obr/min i oddzielnie dla prędkości 2000 obr/min, czyli gdy $k = 1, 2$, w obu modelach ($k = 1, 2$) rozważanych w pierwszym kroku:

$$C_nH_{mij}^{1k} = \alpha_i^{1k} + \beta_{i1}^{1k} N_{ekij} + \beta_{i2}^{1k} N_{ekij}^2 + \beta_{i3}^{1k} N_{ekij}^3 + e_{ij}^{1k} \quad (1)$$

dla i -tej grupy ($i = 1, 2, \dots, 6$), oprócz indywidualnego α_i^{1k} -efektu obiektowego, występowała też indywidualna regresja postaci:

$$\beta_{i1}^{1k} N_{ekij} + \beta_{i2}^{1k} N_{ekij}^2 + \beta_{i3}^{1k} N_{ekij}^3 \quad (2)$$

Dla lepszej orientacji podajemy sposób indeksowania zastosowany w poniższych modelach:

$$C_n H_m{}_{i,j}{}^{s,k} = C_n H_m \begin{matrix} \text{nr modelu, nr prędkości} \\ \text{nr \% RME, nr obserwacji} \end{matrix}$$

Przyjęto dalej, że $i = 1$ dla 0% zawartości RME, $i = 2$ dla 20% zawartości RME, ..., $i = 6$ dla 100% zawartości RME. Dla $k = 1, 2$ oraz w każdej i -tej grupie ($i = 1, 2, \dots, 6$) dokonano 10 pomiarów dla różnych poziomów mocy efektywnej N_{ekij} , co oznacza, że mamy $j = 1, 2, \dots, 10$.

Kolejno dla $k = 1, 2$ stawiamy hipotezę zerową, że współczynniki regresyjne $\beta_{i1}^{1k}, \beta_{i2}^{1k}, \beta_{i3}^{1k}$ są wspólne dla wszystkich 6 grup (wartości RME), tj.:

$$H_0^1: \beta_{11}^{1k} = K = \beta_{61}^{1k}, \beta_{12}^{1k} = K = \beta_{62}^{1k} \text{ i } \beta_{13}^{1k} = K = \beta_{63}^{1k} \quad (3)$$

Hipoteza H_0^1 oznacza równoległość sześciu linii regresji (2) przecinających oś rzędnych w punktach α_i^{1k} .

Tabela 1. Wyniki testowania równoległości 6 linii regresji przy prędkości obrotowej 1600 obr./min

	Sumy kwadratów	Stopnie swobody	Średnie kwadraty	F	p
Równoległość	1774,7410	15	118,3161	0,8576	0,6125
Błąd	4966,4995	36	137,9583		

Oddzielnie dla prędkości obrotowej 1600 obr/min i oddzielnie dla prędkości 2000 obr/min, czyli gdy $k = 1, 2$, hipoteza H_0^1 nie została odrzucona. Tabela 1 przedstawia wyniki testowania tej hipotezy przy 1600 obr./min. zaś tabela 2 – przy 2000 obr./min.

Tabela 2. Wyniki testowania równoległości 6 linii regresji przy prędkości obrotowej 2000 obr./min

	Sumy kwadratów	Stopnie swobody	Średnie kwadraty	F	p
Równoległość	3610,1198	15	240,6747	0,6659	0,7990
Błąd	13010,8017	36	361,4112		

Zatem oddzielnie dla prędkości obrotowej 1600 obr/min i oddzielnie dla prędkości 2000 obr/min (czyli gdy $k = 1, 2$) w modelach rozważanych w drugim kroku ($s = 2$):

$$C_n H_{mij}^{2k} = \alpha_i^{2k} + \beta_1^{2k} N_{ekij} + \beta_2^{2k} N_{ekij}^2 + \beta_3^{2k} N_{ekij}^3 + e_{ij}^{2k} \quad (4)$$

dla $i = 1, 2, \dots, 6$, oprócz indywidualnego α_i^{2k} – efektu obiektowego i -tej grupy, występuje też wspólna dla wszystkich grup regresja postaci:

$$\beta_1^{2k} N_{ekij} + \beta_2^{2k} N_{ekij}^2 + \beta_3^{2k} N_{ekij}^3 \quad (5)$$

Oddzielnie dla $k = 1, 2$ stawiamy hipotezę zerową, że efekty α_i^{2k} dla wszystkich 6 grup są identyczne, tj.:

$$H_0^2: \alpha_1^{2k} = \alpha_2^{2k} = \dots = \alpha_6^{2k} \quad (6)$$

W modelu (4) oddzielnie dla prędkości 1600 obr./min i oddzielnie dla prędkości 2000 obr./min, czyli gdy $k = 1, 2$, hipoteza H_0^2 została odrzucona z powodu braku statystycznych podstaw. Tabela 3 przedstawia wyniki testowania tej hipotezy przy 1600 obr./min, zaś tabela 4 – przy 2000 obr./min.

Tabela 3. Wyniki testowania hipotezy (6) w modelu (4) (o braku jakiegokolwiek przesunięcia 6 linii regresji względem siebie) przy prędkości obrotowej 1600 obr./min

	Sumy kwadratów	Stopnie swobody	Średnie kwadraty	F	p
Grupy	20158,0074	5	4031,6015	26,6079	0,0000
Błąd	7727,4539	51	151,5187		

Tabela 4. Wyniki testowania hipotezy (6) w modelu (4) (o braku jakiegokolwiek przesunięcia 6 linii regresji względem siebie) przy prędkości obrotowej 2000 obr./min

	Sumy kwadratów	Stopnie swobody	Średnie kwadraty	F	p
Grupy	68128,9533	5	13625,7907	37,8507	0,0000
Błąd	18359,3656	51	359,9876		

Odrzucenie oddzielnie dla rozpatrywanej liczby obrotów (dla $k = 1, 2$) hipotez H_0^2 oznacza równoległość sześciu linii regresji i pozostawia nas w obrębie modelu drugiego (4) ($s = 2$) z jego zróżnicowaną postacią dla poszczególnych poziomów RME.

Dostępna w *Excelu* procedura analizy regresji metodą najmniejszych kwadratów wyznacza się estymatory parametrów modeli (4) (dla $k = 1, 2$) oraz wykazuje się nieistotność parametru β_2^{22} , tj. prawdziwość hipotezy $H_0^3: \beta_2^{22} = 0$, gdyż odpowiednia funkcja testowa $t = 1.612$ z 51 stopniami swobody ma p -wartość równą 0.1131. Powoduje to, że dla $k = 2$ (tj. prędkości obrotowej 2000 obr./min) następuje uproszczenie modelu (4) do modelu trzeciego ($s = 3$), bowiem dla $i = 1, 2, \dots, 6$ mamy:

$$C_n H_{mij}^{32} = \alpha_i^{32} + \beta_1^{32} N_{e2ij} + \beta_3^{32} N_{e2ij}^3 + e_{ij}^{32} \quad (7)$$

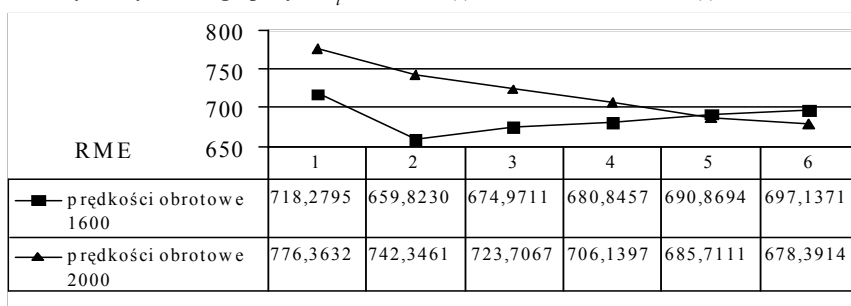
Na zakończenie zestawiamy odpowiednie parametry dwu równoległych rodzin krzywych 3. stopnia w tabelach 5 i 6. Dla ustalonego k odległość pomiędzy tymi krzywymi można odczytać z tabeli 6 poprzez wyznaczenie różnic między efektami grupowymi $\hat{\alpha}_i^{sk} - \hat{\alpha}_{i'}^{sk}$, odpowiadającymi jednakowym prędkościom. Wielkości tych różnic umieszczono w tabeli 7, gdzie górne wartości odpowiadają prędkości obrotowej 1600 obr./min, a dolne prędkości obrotowej 2000 obr./min.

Różnice te opisują zmianę poziomu emisji węglowodorów C_nH_m w spalinach, wywołaną bezpośrednio przez zastosowanie innego paliwa z udziałem RME. Przykładowo, zastąpienie 0% RME przez 100% RME przy 2000 obr./min daje spadek o około 98 jednostek.

Tabela 5. Porównanie oszacowanych parametrów regresji w modelu (4) ($s = 2$ dla $k = 1$, tj. przy prędkości obrotowej 1600 obr./min) i w modelu (9) ($s = 3$ dla $k = 2$, tj. przy prędkości obrotowej 2000 obr./min)

	$\hat{\beta}_1^{sk}$	$\hat{\beta}_2^{sk}$	$\hat{\beta}_3^{sk}$
$k = 1$	-77,5197	4,8004	-0,0927
$k = 2$	-24,8074	0	0,0177

Tabela 6. Estymatory efektów grupowych α_i^{sk} w modelu (4) dla $s = 2$, $k = 1$ i w modelu (7) dla $s = 3$, $k = 2$



W tabeli 7 różnice istotne na poziomie istotności 0,05 oznaczono gwiazdką (*). Stwierdzony brak istotności pewnych różnic przy prędkości obrotowej 2000 obr./min może wiązać się z występującymi w tym przypadku większymi poziomami C_nH_m oraz z prostotą modelu (7) pozbawionego kwadratu N_e . Zasadność rozważania tych i pozostałych różnic można będzie stwierdzić po zwiększeniu liczebności obserwacji.

Tabela 7. Różnice między efektami grupowymi: $\hat{\alpha}_i^{sk} - \hat{\alpha}_{i'}^{sk}$ odpowiadającym jednakowym prędkościom k oraz różnym grupom: $i, i' = 1, 2, \dots, 6$

Różnice	$k = 1$						
	$k = 2$	1	2	3	4	5	6
1	718,2795	0	*-58,4565	*-43,3084	*-37,4338	*-27,4101	*-21,1424
	776,3632	0	*-34,0171	*-52,6565	*-70,2235	*-90,6521	*-97,9718
2	659,823	*58,4565	0	*15,1481	*21,0227	*31,0464	*37,3141
	742,3461	*34,0171	0	-18,6394	-36,2064	-56,635	-63,9547
3	674,9711	*43,3084	*-15,1481	0	5,8746	*15,8983	*22,1660
	723,7067	*52,6565	18,6394	0	-17,567	-37,9956	-45,3153
4	680,8457	*37,4338	*-21,0227	-5,8746	0	10,0237	*16,2914
	706,1397	*70,2235	36,2064	17,567	0	-20,4286	-27,7483
5	690,8694	*27,4101	*-31,0464	*-15,8983	-10,0237	0	6,2677
	685,7111	*90,6521	56,635	37,9956	20,4286	0	-7,3197
6	697,1371	*21,1424	*-37,3141	*-22,1660	*-16,2914	-6,2677	0
	678,3914	*97,9718	63,9547	45,3153	27,7483	7,3197	0

Istotność krzywych z modeli (7) zweryfikowano testem F (por. tab. 8 i 9).

Tabela 8. Test F dla modelu (4) przy prędkości obrotowej 1600 obr./min

Składniki	Stopnie swobody	Sumy kwadratów	Średnie kwadraty	F	p
Regresja	9	329127,0	36569,66	241,354	0,0000
Reszkowy	51	7727,5	151,52		
Razem	60	336854,4			

Tabela 9. Test F dla modelu (7) przy prędkości obrotowej 2000 obr./min

Składniki	Stopnie swobody	Sumy kwadratów	Średnie kwadraty	F	p
Regresja	8	554222,5	69277,81	186,705	0,000
Reszkowy	52	19294,8	371,05		
Razem	60	573517,3			

Wnioski i wyniki badań

Wyprowadzone modele (4) i (7) z parametrami opisanymi w tabelach 5 i 6 pozwalają stwierdzić, że gdy $k = 1$ dla $R = 0,988$ zmienność poziomu węglowodorów C_nH_m w spalinach może być w 95% wyjaśniona zmiennością mocy N_e [kW] rozwijanej przez silnik oraz rodzajem mieszanki RME. Dla $k = 2$ współczynnik determinacji wynosi nawet $R^2 = 0,966$.

Jak pokazano w tabeli 6, przy prędkości obrotowej 2000 obr./min poziom emisji węglowodorów C_nH_m w spalinach silników S-4002 zasilanych mieszankami paliwowymi mineralnego oleju napędowego ON z dodatkiem estru oleju rzepakowego RME zmniejsza się o stałą wielkość wraz ze wzrostem wielkości tego dodatku. Przy prędkości obrotowej 1600 obr./min w przedziale od 0% RME do 20% RME obserwuje się tendencję spadkową zgodną z wyżej opisaną, a na całym pozostałym przedziale % RME widoczną tendencją przeciwną.

Dla prędkości obrotowej 1600 obr./min i 20% RME zaobserwowano najmniejsze emisje C_nH_m .

Poziom emisji węglowodorów gwałtownie wzrasta wraz ze spadkiem mocy efektywnej poniżej 17 kW.

Badanie wpływu biopaliw na zanieczyszczanie środowiska pozostałymi toksycznymi składnikami spalin stanowi główny przedmiot dalszych dociekań naukowych [2, 3, 4, 5].

Piśmiennictwo

1. Milliken G. A., Johnson D. E.: Analysis of messy data. Vol. III: Analysis of covariance. Chapman & Hall/CRC, New York, 2002.
2. Mysłowski J.: Uwagi na temat zasilania paliwem pochodzenia rzepakowego silnika doładowanego Pojazd a środowisko. Politechnika Radomska, Radom 1997.
3. Piekarski W.: Analiza oddziaływania agregatów ciągnikowych na środowisko przyrodnicze. Rozprawy naukowe. Wyd. Akademii Rolniczej w Lublinie, 1997.
4. Wawrzosek J., Piekarski W.: The toxicity level of exhaust gases in tractor engines fed with biofuels. Teka Komis. Mot. Energ. Rol. 2, 164-172, 2002.

5. Wawrzosek J., Piekarski W.: Wpływ zawartości estru oleju rzepakowego w mieszance paliwowej na poziom emisji dwutlenku węgla (w recenzji).

Streszczenie

Poziom emisji węglowodorów C_nH_m w spalinach silników S-4002 zasilanych mieszankami paliwowymi mineralnego oleju napędowego ON z dodatkiem estru oleju rzepakowego RME zmniejsza się o stałą wielkość, wynikającą z wielkości tego dodatku. Natomiast wzrasta on wraz ze spadkiem mocy silnik, a także zależy od rozwijanej przez silnik prędkości obrotowej.

Summary

Emission level of hydrocarbons C_nH_m in combustion fumes of the S-4002 engines fed with fuel mixes of mineral engine oil ON with an addition of rape oil ester RME drops by a constant value dependent on the quantity of the addition. It rises, however, when an engine's power drops; it is also dependent on an engine's rotation speed.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Krasowski