

Wiesław Piekarski*, Jacek Wawrzosek**

*Katedra Pojazdów i Silników

**Katedra Zastosowań Matematyki

Akademia Rolnicza w Lublinie

ANALIZA WPŁYWU ZAWARTOŚCI ESTRU OLEJU RZEPAKOWEGO W MIESZANCE PALIWOWEJ NA POZIOM EMISJI TLENKÓW AZOTU

Streszczenie

Skonstruowano model analizy kowariancji dla poziomu emisji tlenków azotu NO_x w spalinach silników S-4002 zasilanych mieszankami paliwowymi mineralnego oleju napędowego ON z dodatkiem estru oleju rzepakowego RME. Jako zmienną niezależną (grupującą) obrano udział procentowy RME w paliwie. Za zmienną towarzyszącą obrano moc efektywną Ne . Badano wzajemne położenie odpowiednich krzywych opisujących zmienną zależną – poziom NO_x . Dodanie estru oleju rzepakowego RME przy prędkości obrotowej $2000 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ powoduje wzrost poziomu emisji tlenków azotu o około 45,6 jednostek ppm. Emisja wzrasta wraz ze wzrostem mocy efektywnej Ne silnika.

Słowa kluczowe: biopaliwo, estry oleju rzepakowego, tlenki azotu, spaliny silnika, analiza kowariancji

Wstęp

Ciągły wzrost emisji spalin powoduje dalszą degradację środowiska przyrodniczego. Największą szkodę dla środowiska naturalnego wywołują związki toksyczne zawarte w emitowanych spalinach aktualnie użytkowanych pojazdów. Do toksycznych składników spalin zanieczyszczających środowisko zalicza się między innymi: tlenek węgla CO, węglowodory C_nH_m , tlenki azotu NO_x , tlenki siarki SO_x , cząstki stałe PM, sadzę, dwutlenek węgla CO_2 , pyły zawieszinowe. Duże zagrożenie stanowi smog fotochemiczny, gdyż reakcja NO_x z lotnymi substancjami organicznymi pod wpływem promieni UV prowadzi do powstania toksycznych utleniaczy fotochemicznych.

Problem badawczy powstał między innymi z szeregu ograniczeń wynikających z wprowadzania norm europejskich. Szacuje się, że w spalinach pojazdów samochodowych, ciągników, maszyn rolniczych, kolei i żeglugi emitowanych jest do środowiska przyrodniczego około 290 tys. ton tlenków azotu. Mimo, że stanowi to nieco mniej niż 2% ogólnej masy spalin emitowanej przez pojazdy, jest jednak faktem, że powodują kwaśne deszcze, które działają niszcząco na florę i faunę, są przyczyną wielu chorób układu oddechowego, znacznie przyspieszają korozję konstrukcji metalowych (np. elementów budynków, samochodów) oraz zabytków (np. nieodporność wielu gatunków kamieni budowlanych na kwaśne deszcze).

Przeciwdziałanie kwaśnym deszczom stanowi problem międzynarodowy. Twierdzi się, że jedną z najskuteczniejszych metod zmniejszenia emisji szkodliwych składników spalin wydzielanych przez pojazdy jest ograniczanie ich powstawania przez właściwy dobór paliwa (spalane są głównie kopaliny). Stąd dużą nadzieję wiąże się z wykorzystaniem zamienników dla paliw konwencjonalnych tzn. biopaliw do zasilania silników. Sprzyja temu nowa polityka rolna państw europejskich zmierzająca do wykorzystania nieprzeznaczonych do konsumpcji nadwyżek produkcyjnych rolnictwa tłuszczów roślinnych jako składników biopaliw.

Jak jednak dalej w pracy pokazano, poziom emisji tlenków azotu NO_x w spalinach silników S-4002 zasilanych mieszankami paliwowymi mineralnego oleju napędowego ON z dodatkiem estru oleju rzepakowego RME przy prędkościach mocy maksymalnej $n_{N_{max}}$ ($2000 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$) wzrasta o około 45,6 jednostek ppm. Emisja zwiększa się wraz ze wzrostem mocy efektywnej N_e silnika. Analizy poziomu emisji innych toksycznych składników spalin dotyczą prace Tarasińskiej [2002] oraz Piekarskiego i Wawrzoska [2002, 2004].

Cel i zakres pracy

Celem pracy jest statystyczne porównanie poziomu sumarycznej ilości tlenków azotu NO_x 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.

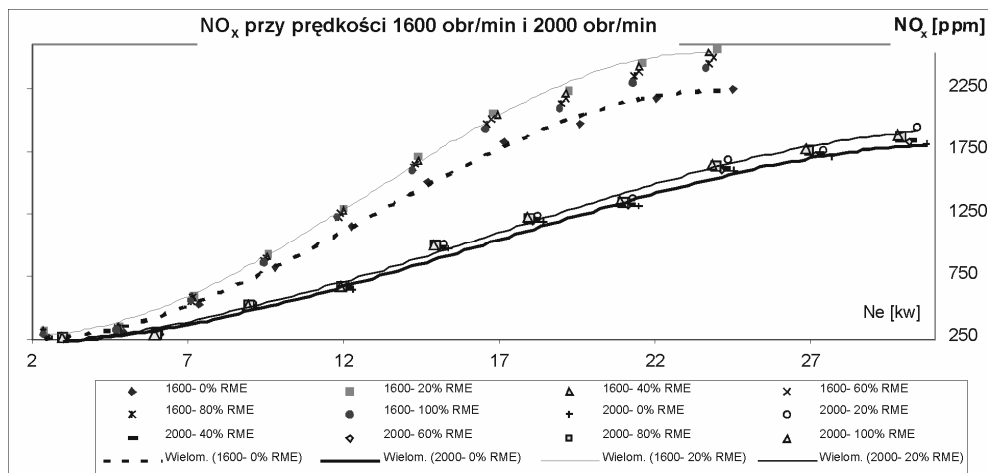
Badania parametrów energetycznych i ekologicznych dotyczących wskaźników pracy i składników spalin silnika S-4002 zasilanego RME i jego mieszaninami z olejem napędowym ON przeprowadzono w Katedrze Pojazdów i Silników Akademii Rolniczej w Lublinie. Badania przeprowadzono na charakterystyce obciążeniowej przy prędkościach mocy maksymalnej $n_{N_{max}}$ ($2000 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$).

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 (2kW-25kW).

Do opracowania statystycznego zebranych wyników pomiarów posłużono się analizą kowariancji [Milliken i Johnson 2002]. Niezbędnych obliczeń dokonano z wykorzystaniem programu *EXCEL*.

Zastosowanie modeli analizy kowariancji w klasyfikacji pojedynczej

Zauważmy, że poziom emisji tlenków azotu zależy od dwu zmiennych: rozwijanej mocy Ne [kW] oraz procentowego udziału RME w mieszance RME i ON. Tę statystyczną zależność NO_x [ppm] od Ne oraz RME przedstawiają na rysunku 1 punkty uzyskane z 120 pomiarów przy prędkościach 1600 obr·min⁻¹ i 2000 obr·min⁻¹. RME w legendzie rysunków oznacza zmienną określającą procentowy udział estru oleju rzepakowego w paliwie.



Rys 1. Zależność poziomu emisji NO_x [ppm] od rozwijanej mocy przy 1600 obr·min⁻¹ i 2000 obr·min⁻¹

Fig 1. Dependency of NO_x emission level [ppm] on the power at 1600 rpm and 2000 rpm

Z analizy wykresu 1 wynika, że występuje wyraźna zależność między poziomem sumarycznej ilości tlenków azotu NO_x w emitowanych spalinach i mocą efektywną Ne , dlatego też znaczna część zmienności NO_x jest wyjaśniona przez zmienną Ne . Z tego względu dla zbadania statystycznego wpływu zawartości estru RME

w paliwie na poziom tlenków azotu zdecydowano się na wykorzystanie metody statystycznej zwanej analizą kowariancji [Milliken i Johnson 2002]. W modelu tym zmienną niezależną (grupującą) jest udział procentowy RME w paliwie, zmienną zależną – poziom tlenków azotu, zaś zmienną towarzyszącą moc efektywna Ne . Ta analiza pozwala usunąć znane źródło zmienności (Ne) tak, aby uwidocznić wpływ czynnika (RME) na zmienną zależną NO_x .

Wstępna analiza statystyczna wykazała, że w zbudowanych oddzielnie dla każdego z poziomów zawartości RME modelach regresji stopnia trzeciego, pomimo ich wysokiej istotności, nieistotnym okazują się parametry przy zmiennej niezależnej Ne_{kij} w stopniu pierwszym, gdyż wszystkie p-value mieszczą się w przedziale (0,6362; 0,7686). W odpowiednio skorygowanych modelach już wysoko istotne są zarówno całe modele jak i występujące w nich wszystkie parametry. Zatem w analizie kowariancji dla prędkości 2000 obr·min⁻¹ (czyli gdy $k=2$), należy uwzględnić tylko kwadrat zmiennej towarzyszącej Ne_{kij}^2 wraz z sześcianiem Ne_{kij}^3 . (Rozważania dla prędkości 1600 obr·min⁻¹, odpowiadającej momentowi maksymalnemu n_{Momax} , czyli gdy $k=1$, uwzględniające za zmienną towarzyszącą Ne_{kij} wraz z jej kwadratem Ne_{kij}^2 i sześcianiem Ne_{kij}^3 przeprowadzono w oddzielnej pracy Piekarskiego i Wawrzoska [2005]). Budowa właściwych modeli wymaga odmiennego postępowania dla $k=1,2$. Indeks k zachowano dla łatwiejszego porównania wyników. Przyjmujemy, 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 ($i=1,2,...,6$) dokonano 10 pomiarów dla różnych poziomów mocy efektywnej Ne_{kij} co oznacza, że mamy $j=1,2,...,10$. Dla lepszej orientacji podajemy sposób indeksowania zastosowany w poniższych modelach:

$$NO_{x\ i,j}^{s,k} = NO_{x\ Nr\%RME, Nr\ Obserwacji}^{Nr\ Modelu, Nr\ Prędkości}$$

Stąd gdy $k=2$, czyli dla prędkości 2000 obr·min⁻¹, w modelu analizy kowariancji w klasyfikacji pojedynczej rozważanym w *pierwszym kroku* ($s=1$):

$$NO_{xij}^{12} = \alpha_i^{12} + \beta_{i2}^{12} Ne_{ij}^2 + \beta_{i3}^{12} Ne_{ij}^3 + e_{ij}^{12} \quad (1)$$

dla i -tej grupy ($i=1,2,...,6$), gdzie oprócz indywidualnego α_i^{12} -efektu obiektowego występuje też indywidualna regresja postaci:

$$\beta_{i2}^{12} Ne_{ij}^2 + \beta_{i3}^{12} Ne_{ij}^3 \quad (2)$$

Stawiamy hipotezę zerową, że współczynniki regresyjne $\beta_{i_2}^{12}, \beta_{i_3}^{12}$ są wspólne dla wszystkich 6 grup (wartości RME), tj.:

$$H_0^1: \beta_{1_2}^{12} = \dots = \beta_{6_2}^{12} \text{ i } \beta_{1_3}^{12} = \dots = \beta_{6_3}^{12} \quad (3)$$

W tabeli 1 hipoteza H_0^1 o braku interakcji $Ne \times RME$ nie została odrzucona, co pozwala uznać równoległość sześciu linii regresji (1) przecinających oś rzędnych w punktach α_i^{12} .

Tabela 1. Wyniki testowania równoległości 6 linii regresji przy prędkości obrotowej 2000 obr·min⁻¹

Table 1. Results of tests on parallelism of the 6 regression lines at the rotational speed 2000 rpm

	Sumy kwadratów	Stopnie swobody	Średnie kwadraty	F	p
interakcje $Ne \times RME$	9318,3896	10	931,839	0,4306	0,9232
błąd	90883,6304	42	2163,896		

Zatem dla prędkości 2000 obr·min⁻¹ (czyli gdy $k=1$) w drugim kroku ($s=2$) rozważamy model

$$NO_{xij}^{22} = \alpha_i^{22} + \beta_2^{22} Ne_{ij}^2 + \beta_3^{22} Ne_{ij}^3 + e_{ij}^{22} \quad (4)$$

dla $i=2,3,\dots,6$.

W modelu (4) dla $i=1,2,\dots,6$ oprócz indywidualnego α_i^{22} -efektu obiektowego i-tej grupy występuje też wspólna dla wszystkich grup regresja postaci:

$$\beta_2^{22} Ne_{ij}^2 + \beta_3^{22} Ne_{ij}^3 \quad (5)$$

Estymatory parametrów regresji w modelu (4), gdy $i=1,2,\dots,6$ wynoszą odpowiednio: $\hat{\beta}_2^{22} = 4,8295$ oraz $\hat{\beta}_3^{22} = -0,0992$. W tabeli 2 zestawiamy odpowiednie oceny parametrów α_i^{22} modelu (4).

Uzyskane wartości estymatorów $\hat{\alpha}_i^{22}$ -efektów obiektowych pozwalają postawić hipotezę o równości wszystkich 6 tych parametrów:

$$H_0^3: \alpha_1^{22} = \alpha_2^{22} = \alpha_3^{22} = \alpha_4^{22} = \alpha_5^{22} = \alpha_6^{22} \quad (6)$$

Jak pokazuje tabela 3, hipoteza H_0^3 została odrzucona.

Tabela 2. Estymatory efektów grupowych α_i^{22} w modelu (4) dla $i=1,2,\dots,6$

Table 2. The estimated parameters of α_i^{22} from the model (4) for $i=1,2,\dots,6$

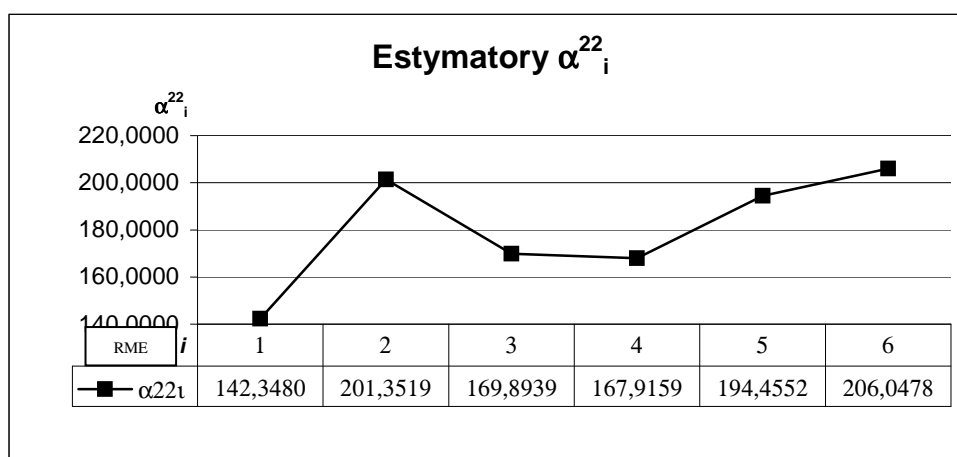


Tabela 3. Wyniki testowania hipotezy H_0^3 przy prędkości obrotowej 2000 obr·min⁻¹

Table 3. Results of tests on the hypothesis H_0^3 at the rotational speed 2000 rpm

	Sumy kwadratów	Stopnie swobody	Średnie kwadraty	F	p
1 grupa	30064,7844	5	6012,957	3,1204	0,0154
błąd	100201,9248	52	1926,960		

Kolejna z postawić hipotezę o równości grupy 5 spośród tych parametrów odpowiadających niezerowej zawartości RME:

$$H_0^4: \alpha_2^{22} = \alpha_3^{22} = \alpha_4^{22} = \alpha_5^{22} = \alpha_6^{22} \quad (7)$$

nie została odrzucona, co pokazuje tabela 4.

Tabela 4. Wyniki testowania hipotezy H_0^4 przy prędkości obrotowej 2000 obr·min⁻¹

Table 4. Results of tests on the hypothesis H_0^4 at the rotational speed 2000 rpm

	Sumy kwadratów	Stopnie swobody	Średnie kwadraty	F	p
2 grupy	12767,5603	4	3191,890	1,6564	0,1742
błąd	100201,9248	52	1926,960		

Ponieważ po odrzuceniu hipotezy H_0^3 kolejna hipoteza H_0^4 nie została odrzucona, możemy skonstruować ostateczny model trzeci ($s=3$) o dwóch elementach:

$$NO_{xij}^{32} = \alpha_r^{32} + \beta_2^{32} Ne_{ij}^2 + \beta_3^{32} Ne_{ij}^3 + e_{ij}^{32} \quad (8)$$

gdzie dla $i=1$ mamy $r=1$, zaś dla $i=2,3,4,5,6$ mamy $r=2$.
 Oszacowując wartości estymatorów parametrów regresji w najnowszym modelu (8), gdy $i=1,2,\dots,6$ uzyskujemy odpowiednio: $\hat{\beta}_2^{22} = 4,8313$ oraz $\hat{\beta}_3^{22} = -0,0993$,
 zaś wartości estymatorów $\hat{\alpha}_i^{22}$ -efektów obiektowych wynoszą: $\hat{\alpha}_1^{32} = 142,2854$
 dla $r=1$, gdy $i=1$; oraz $\hat{\alpha}_2^{32} = 187,8616$ dla $r=2$, gdy $i=2,\dots,6$. Zwróćmy uwagę, że
 oszacowane wartości estymatorów parametrów regresji w modelach (4) i (8)
 niewiele się różnią między sobą. Istotność krzywych regresji w modelu (8) zwer-
 fikowano testem F (por. tabela 5).

Tabela 5. Test F dla modelu (8) przy prędkości obrotowej 2000 obr·min⁻¹
 Table 5. Test F for the model (8) at the rotational speed 2000 rpm

	Sumy kwadratów	Stopnie swobody	Średnie kwadraty	F	p
Regresja	19324105,27	4	4831026,317	2394,7836	0,0000
Reszkowy	112969,49	56	2017,312		
Razem	19437074,75	60			

Podobnie jak hipoteza H_0^3 w modelu (4) również hipoteza:

$$H_0^5: \alpha_1^{32} = \alpha_2^{32} \quad (6)$$

w modelu (8) o równości wszystkich efektów obiektowych została odrzucona co
 pokazuje tabela 6.

Tabela 6. Wyniki testowania hipotezy H_0^5 przy prędkości obrotowej 2000 obr·min⁻¹
 Table 6. Results of tests on the hypothesis H_0^5 at the rotational speed 2000 rpm

	Sumy kwadratów	Stopnie swobody	Średnie kwadraty	F	p
2 grupy	17297,2241	1	17297,224	8,5744	0,0049
błąd	112969,4851	56	2017,312		

Ocena zmian w poziomie emisji tlenków azotu wywołanych zawartością RME

Wraz z dodaniem RME do paliwa następuje zmiana w poziomie emisji NO_x
 w spalinach wydzielanych przez silnik S-4002. Różnicę $\hat{\alpha}_2^{32} - \hat{\alpha}_1^{32} = 45,5762$ inter-
 pretujemy następująco: zastosowanie w silniku S-4002 co najmniej 20 % RME
 przy prędkości 2000 obr·min⁻¹, daje wzrost o około 45,6 jednostek ppm poziomu
 emisji tlenków azotu. Istotność tej różnicy wykazano w tabeli 6.

Wnioski i wyniki badań

1. Wyprowadzony model (8) z parametrami oszacowanymi powyżej, pozwala stwierdzić, że przy prędkościach mocy maksymalnej $n_{N_{emax}}$ (2000 obr·min⁻¹) zmienność poziomu tlenków azotu NO_x w spalinach może być w ponad 99,4% wyjaśniona zmiennością mocy Ne [kW] rozwijanej przez silnik oraz rodzajem mieszanki RME.
2. Wraz z dodaniem RME do paliwa następuje wzrost poziomu emisji NO_x w spalinach wydzielanych przez silnik S-4002. Przy prędkościach mocy maksymalnej wzrost ten nie zależy od poziomu Ne i wynosi około 45,6 jednostek ppm.
3. Największa emisja NO_x zaobserwowano dla Ne równego około 30,75 kW.
4. Przy prędkości obrotowej 1600 obr·min⁻¹ (czyli $k=1$) wzrost poziomu emisji tlenków azotu NO_x w spalinach silników S-4002 zasilanych mieszankami paliwowymi mineralnego oleju napędowego ON z dodatkiem estru oleju rzepakowego RME przedstawia oddzielna praca Wawrzoska i Piekarskiego [2005], która wykazuje również interakcję Ne x RME.

Bibliografia

- Milliken G. A., Johnson D. E. 2002. Analysis of messy data. Vol. III: Analysis of covariance. Chapman & Hall/CRC, New York,
- Mysłowski J. 1997. Uwagi na temat zasilania paliwem pochodzenia rzepakowego silnika doładowanego. Pojazd a środowisko. Politechnika Radomska. Radom.
- Piekarski W., Wawrzosek J. 2004 An influence of rape oil ester content in fuel blend on carbon dioxide emission level, Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture, Lublin, Vol.IV, 159-164.
- Tarasińska J. 2002. Zastosowanie analizy kowariancji do zbadania wpływu biopaliwa rzepakowego na stopień zadymienia spalin. Coll. Biometr. 32, str. 205-212.
- Wawrzosek J., Piekarski W. 2002. The toxicity level of exhaust gases in tractor engines fed with biofuels. Teka Komis. Mot. Energ. Rol. T. 2 s. 164-172.
- Wawrzosek J., Piekarski W. 2006. Udział estru oleju rzepakowego w mieszance paliwowej z olejem napędowym a poziom emisji tlenków azotu, MOTROL, Motorization and Power Industry in Agriculture, Lublin, vol. 8, 240-249.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF RAPE OIL ESTER CONTENT IN FUEL BLEND ON NITRIC OXIDES EMISSION LEVELS

Summary

The article presents an analysis of NO_x emission levels in the fumes of S-4002 engines fed with fuel blends composed of the mineral engine oil ON with an addition of rape oil ester RME in various proportions. As the independent (grouping) variable the percentage of RME in the fuel was chosen. The associated variable was the effective power Ne . The mutual position of respective curves describing the dependent variable NO_x level was examined. The addition of the rape oil ester RME at the rotational speed of 2000 rpm results in the increase of nitric oxides emission level by approximately 45.6 units ppm. The emission increases together with the increase of the engine effective power Ne .

Key words: biofuel, rape oil ester, nitric oxides, fumes of engines, analysis of covariance