

Zbigniew Zdrojewski
Instytut Inżynierii Rolniczej
Akademia Rolnicza we Wrocławiu

PORÓWNANIE SPALANIA BIOPALIWA, OLEJU OPAŁOWEGO I GAZU PROPAN - PRZY RÓŻNYCH CIŚNIENIACH PODAWANEGO PALIWA

Streszczenie

Do jednego pieca o mocy 71-85 kW i pojemności 96 litrów, instalowano palnik na olej opałowy lub biopaliwo oraz palnik na gaz propan. Ustalając stałą ilość podawanego powietrza, zmieniano ciśnienie podawanego paliwa w zakresie 8-11 hPa dla gazu i 14-25 MPa dla olejów. Stwierdzono, że ilość tlenków azotu NO_x była dla obu olejów podobna (55-77 mg/m³, w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza), natomiast dla propanu była o ok. 25 mg/m³ większa. Zawartość tlenku węgla CO dla olejów i mniejszych ciśnień propanu była śladowa, natomiast dla większych ciśnień gazu rosła do 3000 ppm. Strata kominowa zmniejszała się z 7,5 do 7% dla biodiesla, z 8,2 do 5,9% dla oleju opałowego i z 6,8 do 5,5% dla gazu. Temperatury spalin na wylocie z pieca wynosiły dla gazu 133-147 °C, dla biopaliwa 142-169 °C i dla oleju opałowego 146-164 °C.

Słowa kluczowe: tlenki azotu, tlenek węgla, temperatura spalin, współczynnik nadmiaru powietrza, strata spalania, błędy obliczania

Wykaz oznaczeń

CO_2, CO, N_2, O_2, NO_x	– składowe spalin [%]
λ	– współczynnik nadmiaru powietrza [-]
S_k	– strata kominowa [%]
CO_{2max}, O_{2max}	– maksymalne zawartości w spalinach [%]
T_{ob}, T_{sp}	– temperatury otoczenia, spalin [°C]
A, B	– współczynniki do równań [-]
$BBK-S_k, BBW-S_k$	– błędy kwadratowe bezwzględne i względne straty kominowej [%]
$ddCO, ddO_2, ddT_{ob}, ddT_{sp}$	– dokładności przyrządów pomiarowych [% , °C]

Wstęp i cel pracy

Dotychczas większość badań dotyczyła wykorzystania rzepaku do otrzymywania oleju, który można dodawać do oleju napędowego. Nie zaowocowało to jednak w Polsce produkcją i sprzedażą biopaliwa do samochodów, głównie za względów ustawowych. Natomiast coraz większe jest zainteresowanie wykorzystywaniem rzepaku do produkcji oleju przeznaczonego do spalania po dodaniu do oleju opałowego lub nawet spalania bezpośredniego [Karcz, Kosiarek 2004; Organista 2003; Wilk i in. 1999; Machura, Wasylów 1999, Zdrojewski i in. 2002]. Problemem w spalaniu bezpośrednim jest jednak 3,5-krotnie wyższa lepkość oleju roślinnego w porównaniu z olejem opałowym.

Na rynku coraz częściej oferowane są piece przystosowane do spalania różnych paliw po przebrojeniu pieca, np. po zmianie palnika. W praktyce instalację pieca z palnikiem przeprowadza się w ten sposób, by poprzez zmianę ilości podawanego powietrza (na drodze dławieniowej lub ilościowej) lub też zmianę ciśnienia podawanego paliwa, uzyskać na analizatorze spalin zalecane w instrukcji poszczególne wartości składu spalin. Powinno się wówczas osiągnąć najbardziej optymalną, najefektywniejszą pracę pieca.

Badania miały na celu uzyskanie informacji, co do skali zmian składu ilościowego spalin, temperatury spalin i wielkości straty kominowej, w zależności od zmiany ciśnienia podawanego paliwa. Badania te stanowią kontynuację badań zawartych w pracy [Zdrojewski i in. 2005], dotyczących wpływu różnego nadmiaru podawanego do paliwa powietrza na jakość spalania, przy stałej wartości ciśnienia paliwa. Zastosowane na potrzeby aktualnych badań różne ustawienia regulatorów ciśnienia palników, pozwoliły na porównanie spalania różnych paliw przy większych współczynnikach nadmiaru powietrza.

Stanowisko pomiarowe i metodyka badań

Spalanie paliw przeprowadzano w piecu żeliwnym o mocy znamionowej 71-85 kW, przeznaczonym do spalania oleju opałowego typu lekkiego, gazu ziemnego lub gazu płynnego, montując do niego palnik na olej lub gaz. Olejem opałowym wykorzystanym do spalania był Lekki EKOTERM Plus produkcji polskiej, gazem był propan a biopaliwem produkt produkcji czeskiej SETA Diesel, w którym udział estru metylowego oleju rzepakowego wynosił 34%.

W mieszaniu paliwa z powietrzem istotną rolę pełnią proporcje podania obu składników. Zmieniając ilość podawanego paliwa, przy nie ingerowaniu w ilość podawanego powietrza, uzyskuje się różne współczynniki nadmiaru powietrza.

W badaniach w stałym położeniu była tarcza spiętrzająca, regulująca ilość podawanego powietrza poprzez odpowiednie rozdzielanie na 3 strumienie powietrza dostarczanego z dmuchawy. Zmieniane było natomiast ciśnienie podawanego paliwa w reduktorze ciśnieniowym.

Badania zostały dokonane przy użyciu analizatora spalin Spectra 2000. Wykonywano pomiary zawartości tlenu, tlenku węgla i tlenków azotu w spalinach. W oparciu o znajomość ilości tlenu obliczano zawartość CO_2 z zależności (1)

$$CO_2 = CO_{2max} * \left(1 - \frac{O_{2pom.}}{O_{2max}}\right) \quad (1)$$

gdzie:

$$O_{2max} = 20,95\% ,$$

$$CO_{2max} = 15,4\% \text{ dla oleju opałowego i } 13,7\% \text{ dla propanu}$$

Dla biodiesla przyjęto za innym producentem analizatorów, wartość $CO_{2max} = 15,7\%$.

Współczynnik nadmiaru powietrza obliczono z zależności (2)

$$\lambda = \frac{CO_{2max}}{CO_{2pom}} = \frac{O_{2max}}{O_{2max} - O_{2pom}} \quad (2)$$

Stratę kominową S_k , najważniejszy energetyczny parametr spalania, obliczano z równania (3)

$$S_k = (T_{sp} - T_{ot}) * \left(\frac{A}{CO_2} + B\right) * 100 + \frac{\alpha * CO}{CO + CO_2} \quad (3)$$

gdzie:

$$\text{dla oleju napędowego i biopaliwa } A=0,5, B=0,007 \text{ i } \alpha=52$$

$$\text{dla gazu propan } A=0,42, B=0,008 \text{ i } \alpha=32$$

Interesującym jest fakt, że w różnych krajach, czy też przez różnych producentów analizatorów, współczynniki te przyjmują nieco inne wartości. Błędy kwadratowe bezwzględne BBK straty kominowej S_k obliczano z zależności ogólnej (4)

$$BBK_{-S_k} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial S_k}{\partial T_{ot}}\right)^2 * ddT_{ot} + \left(\frac{\partial S_k}{\partial T_{sp}}\right)^2 * ddT_{sp} + \left(\frac{\partial S_k}{\partial O_2}\right)^2 * ddO_2 + \left(\frac{\partial S_k}{\partial CO}\right)^2 * ddCO} \quad (4)$$

a po zróżniczkowaniu i uporządkowaniu z zależności następującej

$$\left. \begin{aligned} & \left[\ddot{d}T_{sp} \cdot B^2 + 2 \cdot \ddot{d}T_{sp} \cdot \frac{A}{\left[CO_{2max} \left(1 - \frac{O_{2pom}}{O_{2max}} \right) \right]} \cdot B + \ddot{d}T_{sp} \cdot \frac{A^2}{\left[CO_{2max}^2 \left(1 - \frac{O_{2pom}}{O_{2max}} \right)^2 \right]} + \ddot{d}T_{Tot} \cdot B^2 + 2 \cdot \ddot{d}T_{Tot} \cdot \frac{A}{\left[CO_{2max} \left(1 - \frac{O_{2pom}}{O_{2max}} \right) \right]} \cdot B + \dots \right. \\ & + \ddot{d}T_{Tot} \cdot \frac{A^2}{\left[CO_{2max}^2 \left(1 - \frac{O_{2pom}}{O_{2max}} \right)^2 \right]} + \ddot{d}O_2 \cdot \frac{A^2}{\left[CO_{2max}^2 \left(1 - \frac{O_{2pom}}{O_{2max}} \right)^4 \cdot O_{2max}^2 \right]} \cdot T_{sp}^2 - 2 \cdot \ddot{d}O_2 \cdot \frac{A^2}{\left[CO_{2max}^2 \left(1 - \frac{O_{2pom}}{O_{2max}} \right)^4 \cdot O_{2max}^2 \right]} \cdot T_{sp} \cdot T_{Tot} + \dots \\ & + 2 \cdot \ddot{d}O_2 \cdot \frac{A}{\left[\left(1 - \frac{O_{2pom}}{O_{2max}} \right)^2 \cdot O_{2max}^2 \right]} \cdot T_{sp} \cdot \alpha - \frac{CO_{pom}}{\left(CO_{pom} + CO_{2max} - CO_{2max} \cdot \frac{O_{2pom}}{O_{2max}} \right)^2} + \ddot{d}O_2 \cdot \frac{A^2}{\left[CO_{2max}^2 \left(1 - \frac{O_{2pom}}{O_{2max}} \right)^4 \cdot O_{2max}^2 \right]} \cdot T_{Tot}^2 - \dots \\ & + 2 \cdot \ddot{d}O_2 \cdot \frac{A}{\left[\left(1 - \frac{O_{2pom}}{O_{2max}} \right)^2 \cdot O_{2max}^2 \right]} \cdot T_{Tot} \cdot \alpha - \frac{CO_{pom}}{\left(CO_{pom} + CO_{2max} - CO_{2max} \cdot \frac{O_{2pom}}{O_{2max}} \right)^2} + \ddot{d}O_2 \cdot \alpha^2 \cdot \frac{CO_{pom}^2}{\left(CO_{pom} + CO_{2max} - CO_{2max} \cdot \frac{O_{2pom}}{O_{2max}} \right)^4 \cdot O_{2max}^2} + \dots \\ & \left. + \ddot{d}CO \cdot \frac{\alpha^2}{\left(CO_{pom} + CO_{2max} - CO_{2max} \cdot \frac{O_{2pom}}{O_{2max}} \right)^2} - 2 \cdot \ddot{d}CO \cdot \frac{\alpha^2}{\left(CO_{pom} + CO_{2max} - CO_{2max} \cdot \frac{O_{2pom}}{O_{2max}} \right)^3} \cdot CO_{pom} + \ddot{d}CO \cdot \alpha^2 \cdot \frac{CO_{pom}^2}{\left(CO_{pom} + CO_{2max} - CO_{2max} \cdot \frac{O_{2pom}}{O_{2max}} \right)^4} \right] \end{aligned} \right\} \left(\frac{1}{2} \right)$$

Wyniki badań

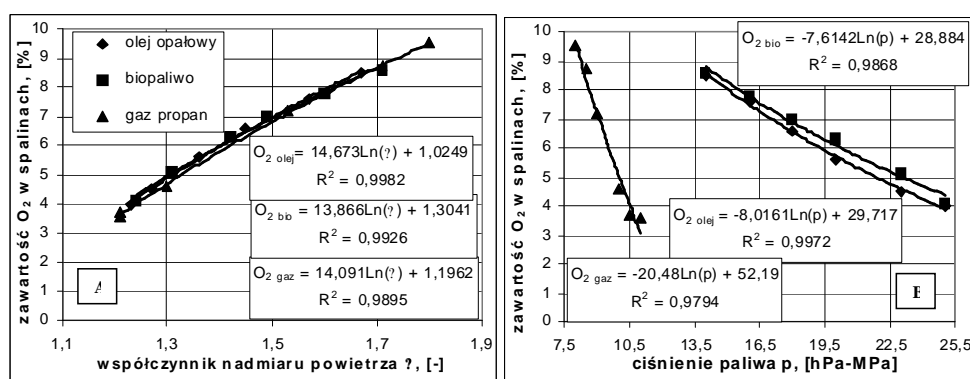
Przy użyciu regulatora ciśnienia ustalono 6 różnych nastaw, a co za tym idzie 6 różnych wartości ciśnienia, zarówno dla gazu jak i dla olejów (tabela 1). Stąd dla olejów opałowego i biodiesla ustalono zakres 14-25 barów, a dla gazu propan zakres 8-11 milibarów. Oba zakresy pozwoliły czynić badania spalania porównywalnymi dla gazu i olejów, ponieważ uzyskano porównywalne współczynniki nadmiaru powietrza w zakresie od 1,2 do 1,8.

Tabela 1. Wartości ciśnienia podawanego paliwa p dla poszczególnych nastawień
Table 1. Values of fuel pressure p for different regulator position

Pozycje ustawienia ciśnienia paliwa	Rodzaj paliwa		
	Olej opałowy ECOTERM Plus	Biodiesel SETA	Gaz ciekły - Propan
[-]	[MPa]	[MPa]	[hPa]
1	1,4	1,4	8
2	1,6	1,6	8,5
3	1,8	1,8	9
4	2	2	10
5	2,3	2,3	10,5
6	2,5	2,5	11

Wyniki badań w postaci wykresów przedstawione są w dwóch układach, co pozwala na pełniejszą interpretację wyników. W jednym układzie poszczególne parametry przedstawiane są w funkcji ciśnienia paliwa (gdzie dla gazu są to hPa, a dla olejów MPa), w drugim zaś układzie w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza λ. Wszystkie zależności opisano równaniami przy wysokich współczynnikach determinacji 0,96-0,99.

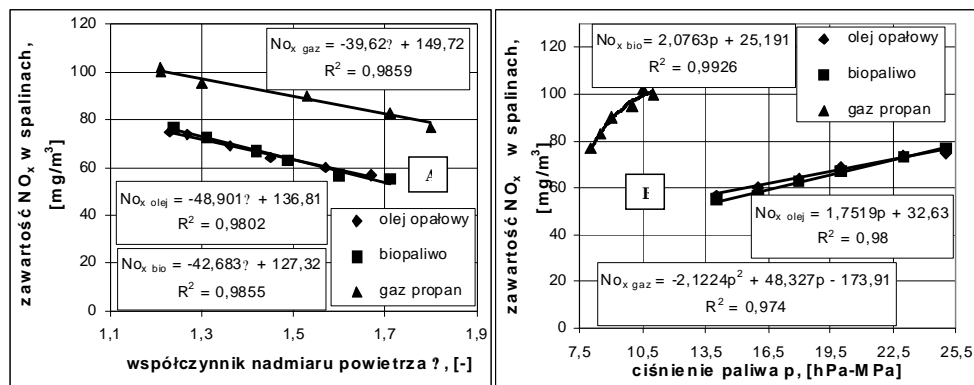
Jak wynika ze wzoru 2, współczynnik nadmiaru powietrza λ jest w funkcji zawartości tlenu O_2 w spalinach. Z danych zawartych na rys. 1A wynika znaczna porównywalność zależności między tymi wielkościami O_2 i λ dla gazu i obu rodzajów użytych do spalania olejów. Oznacza to bardzo dobre ustalenie zakresu ciśnień zarówno dla propanu [hPa] jak i dla obu olejów [MPa]. Z kolei z rysunku 1B wynika, że redukując ciśnienie paliwa z 25 do 14 barów dla oleju (zmniejszając tym samym ilość podawanego paliwa), zwiększa się ilość tlenu z 4 do 8,5%. Podobnie jest dla gazu - z 3,5 do 9,5%. Z tego wykresu widać również, że spalając biopaliwo, zawartość tlenu w spalinach była nieco wyższa, aniżeli dla oleju - o ok. 0,4%, dla większych ciśnień.



Rys. 1. Zawartość tlenu O_2 w spalinach, w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza λ (A) i ciśnienia paliwa p (hPa- dla gazu i MPa- dla oleju i biopaliwa) (B)

Fig. 1. Contents of oxygen O_2 in the exhaust, in dependence on the coefficient of excess air λ (A) and on the pressure of fuel p (hPa- for gas and biodiesel) (B)

Zawartość tlenków azotu w spalinach przedstawia rysunek 2. Okazuje się, że bardzo zbliżone ilości NO_x otrzymano przy spalaniu oleju opałowego (57-75 mg/m^3) i biodiesla (55-77 mg/m^3). Przy spalaniu propanu, ilość tlenków azotu jest o ok. 20 mg/m^3 większa. Zależności te są liniowe zarówno dla olejów jak i dla gazu. W badaniach ze zmiennym położeniem tarczy spiętrzającej [Zdrojewski i in. 2005], w przypadku biopaliwa zawartość NO_x była jednak o ok. 20 mg/m^3 większa w porównaniu z olejem opałowym. W badaniach Pałowski [1993] z silnikiem wysokoprężnym, dla biopaliwa, wartości NO_x były również o 20% większe, ale dotyczyło to oleju napędowego.

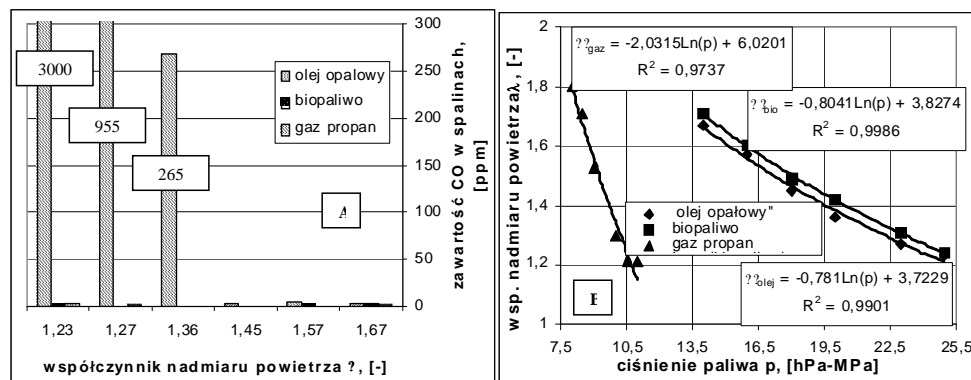


Rys. 2. Zawartość tlenku azotu NO_x w spalinach, w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza λ (A) i ciśnienia paliwa p (hPa- dla gazu i MPa- dla oleju i biopaliwa) (B)

Fig. 2. Contents of nitric oxide NO_x in the exhaust, in dependence on the coefficient of excess air λ (A) and on the pressure of fuel p (hPa- for gas and MPa- for oil and biodiesel) (B)

Ilości tlenku węgla w spalinach są dla obu olejów śladowe, nie przekraczające kilku ppm w całym badanym zakresie ciśnień (rys. 3A). Dla gazu jest podobnie, ale jedynie dla większych współczynników nadmiaru powietrza $\lambda > 1,3$ (czyli dla mniejszych wartości ciśnienia paliwa). Dla większych wartości ciśnień (a zatem zwiększającej się ilości podawanego paliwa) gwałtownie wzrasta ilość tlenku węgla, nawet do 3000 ppm (0,3%). Zasadniczo różni się w tym zakresie spalanie propanu w porównaniu z olejami. Jednocześnie stwierdzić należy, że zarówno zawartości tlenu węgla jak i tlenków azotu mieszczą się w wymaganiach na „znak bezpieczeństwa ekologicznego”, które powinny nie przekraczać odpowiednio 5000 ppm i 400 ppm.

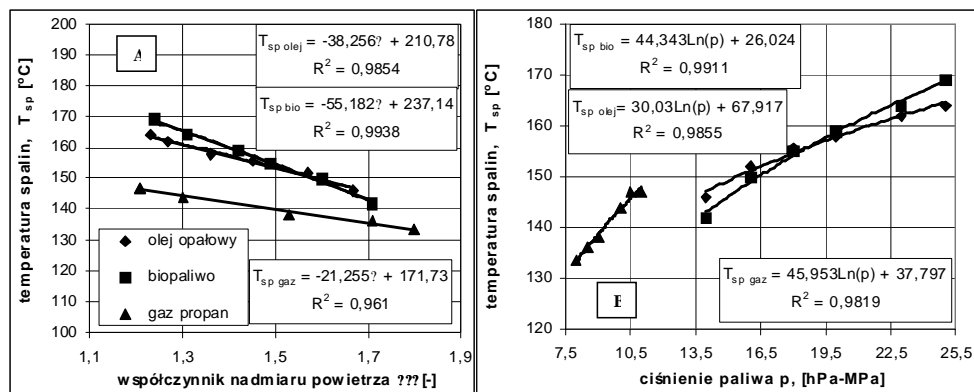
Jak wynika z teorii, wraz ze zwiększaniem ilości podawanego paliwa, przy stałej ilości podawanego powietrza, zmniejsza się wartość współczynnika nadmiaru powietrza λ (rys. 3B). Lepiej od prostoliniowej opisuje tę zależność krzywa logarytmiczna (wyższe R^2). Dla biodiesla współczynnik λ przyjmuje wartości nieco wyższe, o ok. 0,05 w całym zakresie $\lambda=1,2-1,7$.



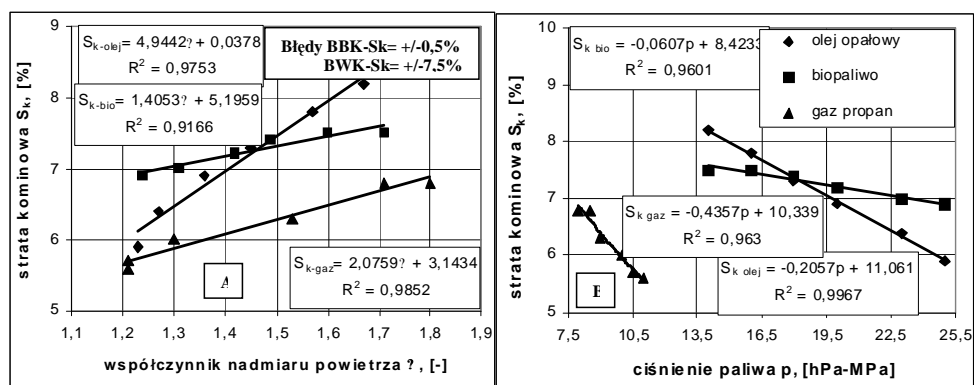
Rys. 3. Zawartość tlenku węgla CO w spalinach (A) oraz zależność współczynnika nadmiaru powietrza λ od ciśnienia paliwa p (hPa- dla gazu i MPa- dla oleju i biopaliwa) (B)
 Fig. 3. Contents of monoxide carbon CO in the exhaust (A) and dependence of the coefficient of excess air λ on the pressure of fuel p (hPa- for gas and MPa- for oil and biodiesel) (B)

Większa temperatura spalin oznacza gorsze wykorzystanie spalin przez piec. Uzyskiwane na wylocie z pieca temperatury spalin są przedstawione na rys. 4. Osiągają one wartości 132-147°C w przypadku propanu, 142-170°C dla biopaliwa i 146-164 °C w przypadku oleju opałowego. Zależność temperatury spalin od ciśnienia podawanego paliwa jest odmienna dla oleju opałowego i dla biodiesla. Dla biopaliwa wyższy jest bowiem współczynnik kierunkowy tej zależności. Oznacza to, że wraz ze zmniejszaniem się ciśnienia podawanego paliwa, coraz niższa w porównaniu z olejem opałowym jest temperatura spalin z biopaliwa aniżeli z oleju opałowego, co oznacza ich lepsze wykorzystanie przez piec. W badaniach ze zmiennym położeniem tarczy spiętrzającej [Zdrojewski i in.2005], temperatura spalin wylotowych z biopaliwa była większa o ok. 10 °C od temperatury spalin z oleju opałowego, lecz współczynniki kierunkowe prostych były zbliżone w badanym zakresie $\lambda = 1,15-1,30$. Rozbieżność współczynników kierunkowych jest widoczna dopiero w tych badaniach po rozszerzeniu zakresu λ na 1,20-1,80. Związane to musi być z faktem, że wartość opałowa oleju opałowego EKOTERM Plus wynosi 43,3 MJ/kg, a biopaliwa SETA 49 MJ/kg (wg producentów).

Strata kominowa S_k , jak wynika z zależności (3) jest zależna od kilku wielkości: od rodzaju paliwa, temperatury spalin, ilości dwutlenku i tlenku węgla w spalinach. Odwrotnie aniżeli było to przy temperaturze spalin, zmiana podawanego ciśnienia paliwa ma tu zdecydowanie większy wpływ na wartość straty kominowej dla oleju w porównaniu z biopaliwem (rys. 5).



Rys. 4. Zależność temperatury spalin T_{sp} od współczynnika nadmiaru powietrza λ (A) i ciśnienia paliwa p (hPa- dla gazu i MPa- dla oleju i biopaliwa) (B)
 Fig. 4. Dependence of the temperature of the exhaust T_{sp} on the coefficient of excess air λ (A) and on the pressure of fuel p (hPa- for gas i MPa- for oil and biodiesel) (B)



Rys. 5. Zależność straty kominowej S_k od współczynnika nadmiaru powietrza λ (A) i ciśnienia paliwa p (hPa- dla gazu i MPa- dla oleju i biopaliwa) (B)
 Fig. 5. Dependence of chimney loss S_k , on the coefficient of excess air λ (A) and on the pressure of fuel p (hPa- for gas i MPa- for oil and biodiesel) (B)

Przy tym samym zakresie ciśnień, dla biodiesla strata kominowa zmienia się przy S_k =ok. 7% jedynie o ok. 0,5%, podczas gdy dla oleju jest to zmiana aż o ok. 2,3%. Oznacza to tym samym, że spalając biopaliwo, nieznacznie zmienia się strata

kominowa, przy zmianie ciśnienia podawanego paliwa. Ponad dwu procentowa różnica w stracie kominowej między olejem i biodiesłem jest już wielkością znaczącą. Powyższe wartości należy oceniać, wiedząc, że błąd bezwzględny obliczania straty kominowej wynosił +/- 0,5%, a błąd względny +/- 7,5%.

Wnioski

1. Zwiększenie ciśnienia paliwa, zmniejsza ilość tlenu w spalinach - z 8,5 do 4% dla olejów i z 9,5 do 3,5% dla propanu.
2. Ilość tlenków azotu NO_x w spalinach dla biopaliwa i oleju w całym zakresie ciśnień bardzo podobna (55-77 mg/m³), natomiast dla gazu była większa o ok. 25 mg/m³.
3. Dla oleju i biopaliwa ilość tlenku węgla CO była rzędu kilku ppm. Dla gazu było podobnie dla mniejszych ciśnień, natomiast dla większych gwałtownie rosła do 1000-3000 ppm (czyli 0,3%).
4. W zastosowanym zakresie ciśnień, zwiększenie ciśnienia w przypadku biodiesła skutkuje zmniejszeniem straty kominowej jedynie o 0,5% (z 7,5 do 7%), a dla oleju opałowego o 2,3% (z 8,2 do 5,9%). Dla gazu strata zmniejszyła się z 6,8 do 5,5%.
5. Dla średnich ciśnień, temperatury spalin na wylocie z pieca wynosiły dla gazu ok. 140°C, natomiast dla oleju i biopaliwa były podobne i wynosiły ok. 155 °C. Odwrotnie niżeli dla straty kominowej, współczynnik kierunkowy oleju opałowego jest znacznie większy ($a = -0,20$) od tego dla biopaliwa ($a = -0,06$).

Bibliografia

Karcz H., Kosiarek A. 2004. Wykorzystanie olejów roślinnych jako paliw energetycznych w ciepłownictwie. COW, nr 3, s.5-10.

Machura K., Wasylów J. 1999. Nowe normy emisji substancji zanieczyszczających w spalinach kotłowych i co dalej ?.Gospodarka Paliwami i Energią, nr 4, s. 2-4.

Organista W. 2002. Analiza zastosowania paliw pochodzenia roślinnego oraz mieszanian z olejem opałowym lekkim do opalania urządzeń grzewczych. Konferencja Nauk.-Techniczna, Energetyka 2002, Wrocław.

Pągowski Z. 1993. Zastosowanie paliw roślinnych w silnikach wysokoprężnych. Badania i perspektywy. Paliwa alternatywne do silników spalinowych, IBMER, Warszawa.

Wilk R, Szlęk A., Piątek R, Zieliński Z. 1999. Wpływ warunków spalania oleju opałowego lekkiego na emisję substancji toksycznych w paleniskach małej mocy. *Archiwum Ochrony Środowiska*, Vol. 25, nr 2, s. 45-60.

Zdrojewski Z., Peroń S. Starek M. 2002. Opłacalność wykorzystania rzepaku na biopaliwo. *Inż. Rol.* 5(38): 519-526.

Zdrojewski Z., Figiel., Peroń S. 2005. Analiza porównawcza spalania w piecu grzewczym oleju opałowego, biodiesla i gazu ciekłego dla różnego nadmiaru podawanego powietrza. *Inż.Rol.*, 4(64): 349-357.

COMPARISON OF COMBUSTION OF OIL, BIOFUEL AND LPG IN A HEAT FURNACE - AT DIFFERENT PRESSURE OF FUEL

Summary

Oil, biofuel and liquid gas propan were burned in the heat furnace of thermal power 71-85 kW, using 2 burners (oil or gas). Pressure was regulated for gas from 8 to 11 hPa and for oil from 14 to 25 MPa. Amount of carbon monoxide was very small for oil and bio fuel. For gas was the same but only for low pressure. For higher pressure, amount of *CO* increased up to 3000 ppm. Amount of nitric oxide was the same for oil and biodiesel (from 55 to 77 mg/m³) and for gas was higher about 25 mg/m³. Chimney losses for LPG were the lower, 6%, and for biodiesel 0,5% higher than for fuel oil, 7%. When the pressure increased, chimney losses for biodiesel changed only a little (from 7,5 to 7%), but for oil were higher (from 8,2 to 5,9%) and for gas were the smallest (6,8 to 5,5%). Temperatures of exhaust for biodiesel and oil were quite the same (142-169°C and 146-164°C respectively), but for gas propan were the lowest (133-147°C).

Key words: nitric oxide, carbon monoxide, oxygen, coefficient of excess air, exhaust temperature, chimney losses, errors of calculation