

# STĘŻENIA ZANIECZYSZCZEŃ Z KOTŁA O MOCY 15 kW ZASILANEGO PELETAMI Z ŁUSEK SŁONECZNIKA

Marek JUSZCZAK

Politechnika Poznańska

Instytut Inżynierii Środowiska, Zakład Ogrzewnictwa, Klimatyzacji i Ochrony Powietrza  
ul. Piorowo 3a, 60-965 Poznań, [marekjuszczak8@wp.pl](mailto:marekjuszczak8@wp.pl)

## STRESZCZENIE

Zastosowano pelety z łusek słonecznika do palnika szufladowego, przeznaczonego do peletów drzewnych. Palnik, o stałym strumieniu powietrza do spalania, zamontowano w kotłowni, w kotle o mocy 15 kW. Mierzono stężenia CO, CxHy, NO, NO<sub>2</sub> i pyłu. Mimo obniżenia temperatury w palenisku do około 700°C, poprzez zmniejszenie strumienia paliwa, nie udało się uniknąć całkowicie zjawiska mięknięcia i zlepiania się popiołu. Spowodowało to zwiększenie stężenia CO do około 6500 mg/m<sup>3</sup> (przy 10% O<sub>2</sub>) i zmniejszenie sprawności cieplnej kotła do 63%. Testy dla mieszaniny z peletami drzewnymi wskazały obniżenie stężenia CO do 2153, 1683 i 966 mg/m<sup>3</sup> (przy 10% O<sub>2</sub>), przy udziale objętościowym peletów drzewnych 25, 50 i 75%, a stężenia węglowodorów do około zera. Określono wpływ temperatury w komorze spalania i stężenia tlenu na stężenia zanieczyszczeń. Oszacowano wskaźniki emisji. Przedstawiono przebieg mierzonych parametrów dla wybranej godziny.

### 1. Wprowadzenie

Kotły małej mocy na paliwo stałe, emitują dużo produktów niepełnego spalania na jednostkę wytworzonej energii, ze względu na niską temperaturę w palenisku, nie najlepszą dystrybucję powietrza oraz krótki czas przepływu spalin z paleniska do wymiennika ciepła. W Niemczech, udział małych palenisk na drewno w produkcji energii, wynosi około 1% a w emisji produktów niepełnego spalania 16-40% [1]. W Polsce prawdopodobnie emisja ta, w przeliczeniu na jednostkę wytwarzanej energii, nie będzie mniejsza, bowiem stosuje się częściej tanie kotły o niskiej sprawności cieplnej. Biomasa rolnicza musi być spalana w temperaturze niższej niż drewno, ze względu na większą zawartość K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O i SiO<sub>2</sub>, które tworzą eutektyki w popiele, odpowiednio o temperaturze topnienia 874 i 764°C [2, 3]. Popiół drzewny topi się w temperaturze powyżej 1000°C [4]. Obecnie pelety drzewne są stosowane dość często w kotłowniach centralnego ogrzewania i stężenia tlenu w spalinach wahają się w zakresie 300-1200 mg/m<sup>3</sup> (w przeliczeniu na 10% stężenie tlenu) [4, 5, 6], zależnie od jakości peletów i rodzaju palnika. Dla peletów z biomasy rolniczej różnego rodzaju próbuje się niekiedy zastosować w kotłach grzewczych palniki dostosowane do peletów drzewnych. Zbyt wysoka temperatura w palenisku powoduje jednak mięknięcie i zlepianie się popiołu, stwarzając problemy w eksploatacji palnika, zwiększając emisję tlenu węgla i węglowodorów oraz zmniejszając sprawność cieplną kotła. Aby ograniczyć zjawisko mięknięcia popiołu, trzeba obniżyć temperaturę w palenisku, np. poprzez zmniejszenie strumienia paliwa, przy niezmiennym strumieniu powietrza podawanego do spalania. Skutkuje to obniżoną wydajnością i sprawnością cieplną kotła, przy trochę mniejszej, ale nadal wysokiej, emisji tlenu węgla i niekiedy węglowodorów.

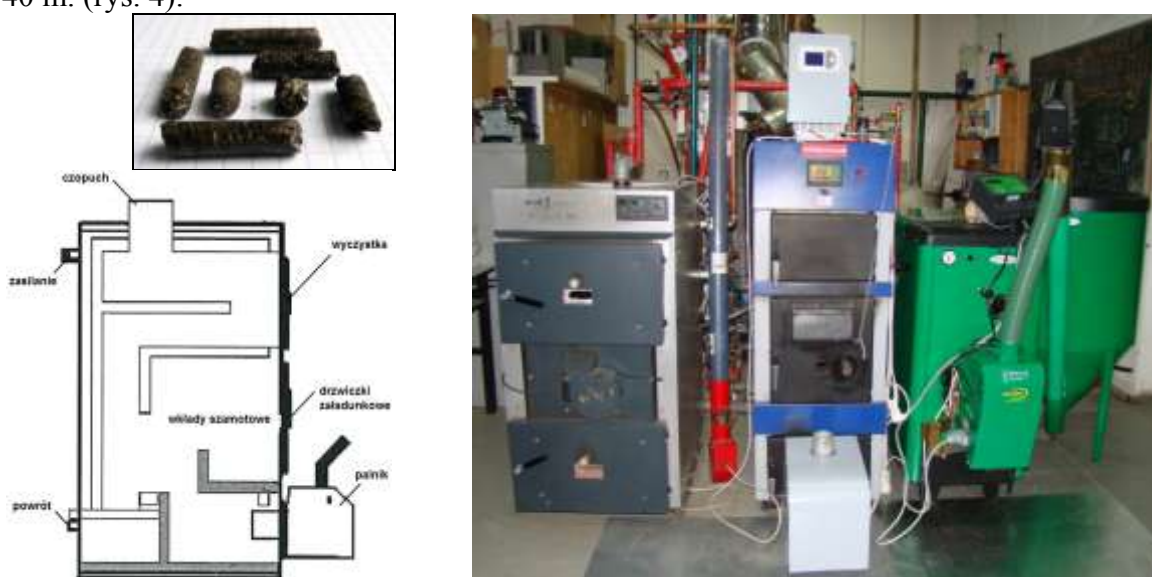
Celem pracy było przebadanie stężeń zanieczyszczeń ze spalania peletów z łusek słonecznika w palniku szufladowym, przeznaczonym do spalania peletów drzewnych, zlokalizowanym w kotle pracującym w kotłowni grzewczej.

## 2. Materiał

Badaniami objęto pelety z łusek słonecznika o średnicy 8 mm i długości od 15 do 40 mm. Skład elementarny (oznaczono w akredytowanym laboratorium): C –  $49,56 \pm 0,041\%$ , H –  $5,98 \pm 0,041\%$ , N –  $0,86 \pm 0,014\%$ , S –  $0,04 \pm 0,061\%$ . Wilgotność  $7,9 \pm 0,3\%$  oznaczono zgodnie z [7]. Ciepło spalania  $22968 \text{ kJ/kg}$  i wartość opałową  $22470 \text{ kJ/kg}$ , wyznaczono wg [8]. Zawartość popiołu i wynosiła około  $1,9\%$ .

## 3. Stanowisko do badań

W kotłowni grzewczej, należącej do Zakładu Ogrzewnictwa, Klimatyzacji i Ochrony Powietrza Instytutu Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej, budowanej do badań emisji etapami od 2003 r. (rys. 1), w kotle ze spalaniem dolnym o mocy 15 kW na polana drzewne, w miejsce stałego rusztu umieszczono palnik szufladowy do peletów drzewnych (rys. 2). Znajduje się tam także drugi kocioł o mocy 25 kW, spalający polana drzewne dwustopniowo: zgazowanie drewna i spalanie gazu drzewnego. Trzeci kocioł o mocy 20 kW (zainstalowany w kwietniu 2010 r.) wyposażony jest w palnik retortowy na pelety drzewne. Kotły nie pracują równocześnie i współpracują z zasobnikiem ciepła o pojemności  $900 \text{ dm}^3$  (rys. 1). Pelety dozowane są z zasobnika za pomocą podajnika śrubowego o stałych obrotach. Palnik posiada również dozownik śrubowy o stałych obrotach, zsynchronizowany z podajnikiem peletów. Strumień paliwa można zmieniać ustalając czas pracy podajnika śrubowego i czas przerwy. Strumień powietrza do spalania, z wentylatora palnika, jest stały. Układ mieszająco-pompowy między kotłem a zasobnikiem ciepła umożliwia przepływ wody w kotle dopiero po uzyskaniu temperatury  $64^\circ\text{C}$  aby ścianki komory spalania miały jak najwyższą temperaturę, co poprawia warunki spalania. Spaliny odprowadzane są stalowym, izolowanym kominem ze stali kwasoodpornej o średnicy 200 mm i wysokości 8,5 m. Ciepło przekazywane jest do atmosfery za pomocą chłodnicy wentylatorowej, umieszczonej na dachu kotłowni (rys. 3) lub do węzła cieplnego, umieszczonego w domu do badań, o powierzchni około  $100 \text{ m}^2$ , przebudowanym obecnie do standardu domu pasywnego, za pomocą izolowanej podziemnej sieci cieplnej o średnicy wewnętrznej 36 mm i długości około 40 m. (rys. 4).



Rys. 1. Kotłownia z dwoma kotłami na polana drzewne, o mocy 15 kW (z palnikiem na pelety) oraz 25 kW (ze zgazowaniem) i kotłem o mocy 20 kW z palnikiem retortowym na pelety; schemat kotła z palnikiem; pelety z łusek słonecznika



Rys. 2. Widok palnika: podajnik śrubowy i otwory wlotowe powietrza; popiół z łusek słonecznika; wentylator i podajnik palnika; płomień w palniku (otwartym dla demonstracji)



Rys. 3. Komin izolowany o średnicy 200 mm wysokości 8,5 m. i chłodnica wentylatorowa o mocy 50 kW



Rys. 4. Sieć ciepłna podziemna (pokazana w czasie budowy) o długości około 40 m i średnicy wewnętrznej 36 mm; węzeł ciepłny c.o. i cwg. o mocy 50 kW, w domu badawczym

### 3. Metodyka badań i aparatura pomiarowa

W celu ograniczenia mięknięcia i zlepiania się popiołu oraz zmniejszenia stężeń CO i  $C_xH_y$  zmniejszono strumień paliwa, obserwując palenisko przez wziernik, oraz wskazania analizatora spalin. Ustalono tryb pracy palnika: 10 sekund pracy podajnika peletów i 10 sekund przerwy. Analizatorem typu Vario Plus (MRU) mierzono za kotłem stężenia  $O_2$ , NO,  $NO_2$  (pomiar elektrochemiczny), CO oraz  $C_xH_y$  w przeliczeniu na  $CH_4$ , (w podczerwieni) oraz temperaturę spalin za kotłem. Analizator wyliczał współczynnik nadmiaru powietrza, stratę wylotową oraz stężenie tlenków azotu ( $NO_x$ ), jako sumę stężeń NO (w przeliczeniu na  $NO_2$ ) i  $NO_2$ . Temperaturę w komorze spalania mierzono termoparą PtRh/Pt w osłonie ceramicznej. Badania trwały bez przerwy 9 godzin. Dla analizy wyników czas badań podzielono umownie na 9 pomiarów 1-godzinnych, gdyż spodziewano się znacznych zmian wartości mierzonych parametrów, z powodu mięknięcia popiołu. Ultradźwiękowym licznikiem ciepła mierzono moc cieplną kotła oraz ilość ciepła przekazywanego do wody. Wartości parametrów zbierano co 10 sekund, rejestrowano w komputerze i uśredniano w 1-godzinnych okresach pomiarowych. Stężenie pyłu w kominie mierzono czterokrotnie pyłomierzem grawimetrycznym z izokinetycznym zasysaniem spalin. Wagowo określono kilkakrotnie strumień masy paliwa. Przeprowadzono również 1-godzinne testy spalania w mieszaninie z peletami drzewnym (tabela 1), dla stwierdzenia możliwości obniżenia stężenia CO.

### 4. Wyniki badań i dyskusja

Próbując ograniczyć mięknięcie popiołu i stężenie CO, strumień paliwa zmniejszono do 2,14 kg/h. Dla wartości średnich z 9 pomiarów obliczono niepewność, dla 95% poziomu ufności. Na rys. 5 i w tabeli 1 przedstawiono wartości i zmienność parametrów, pomierzonych i wyliczonych w czasie czwartej godziny pomiarowej (gdy mięknięcie i zlepianie się popiołu było małe) oraz wartości średnie z 9 pomiarów. Stężenie  $NO_2$  było bardzo małe i zostało podane przez analizator jako suma  $NO_x$ . W mieszaninie (z udziałem 25, 50 lub 75% obj.



peletów drzewnych) stężenie CO było znacznie niższe i malało ze wzrostem udziału drewna (tabela 1). Stężenie  $C_xH_y$  było bliskie zera. Na rys. 6 przedstawiono zależność stężeń zanieczyszczeń od temperatury w komorze spalania i stężenia tlenu, dla 4. godziny badań (pomiar nr 4, tabela 1).

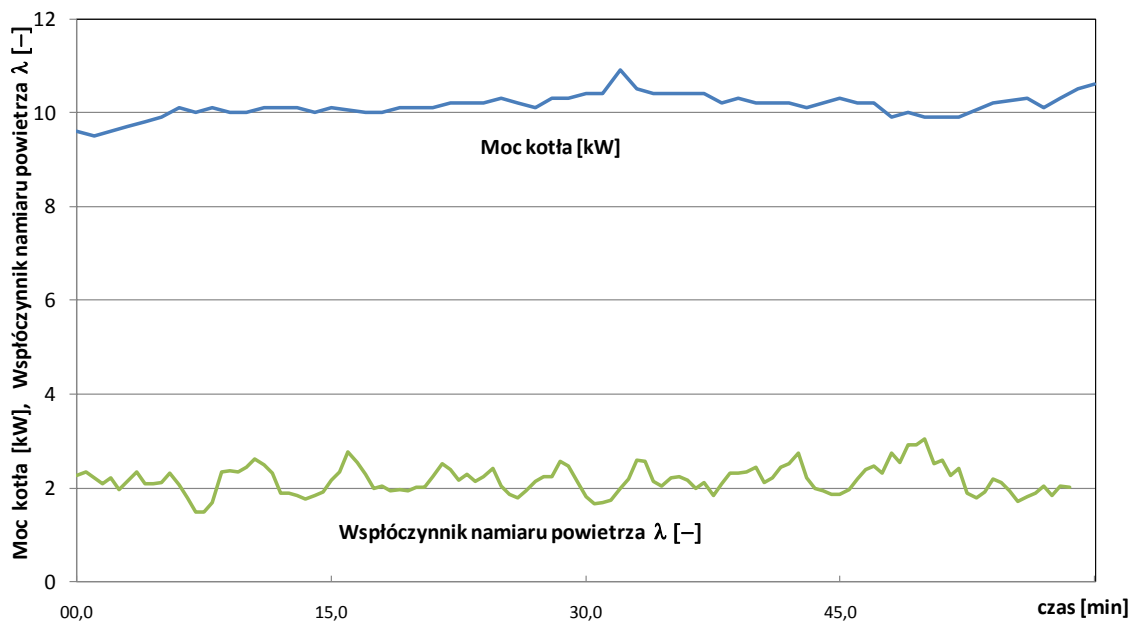
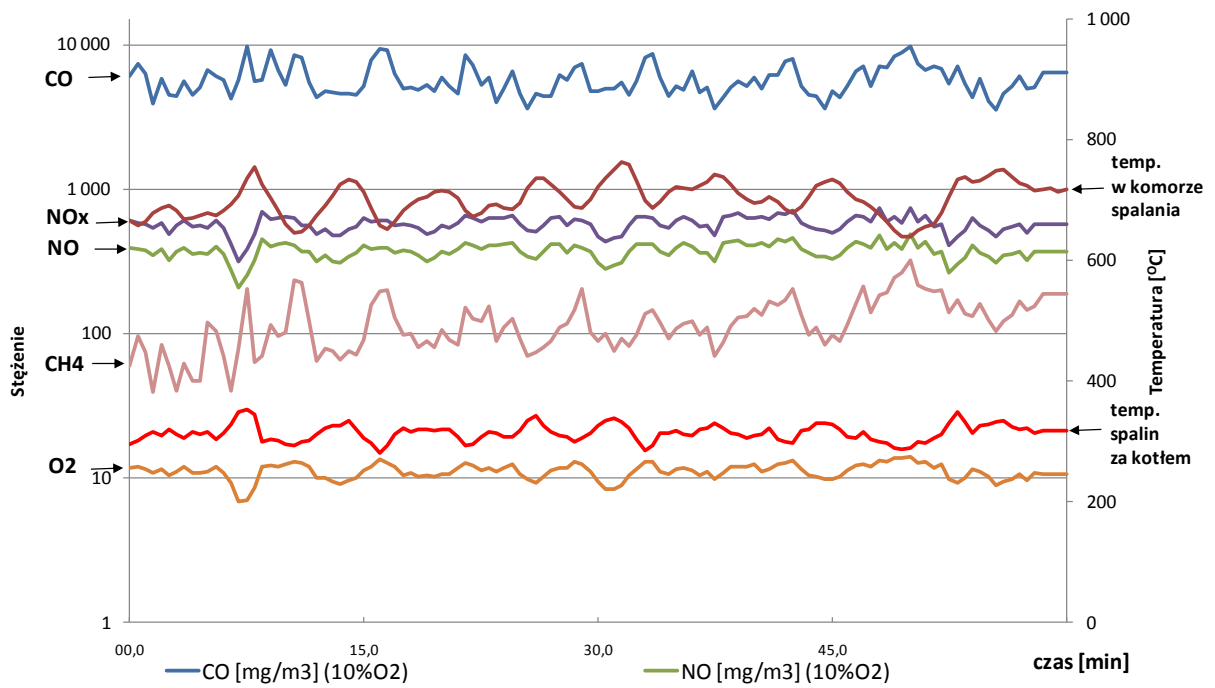
Tabela 1. Wyniki pomiarów z 4. godziny badań, średnich z 9 pomiarów oraz ze spalania mieszaniny z peletami drzewnymi

Parametry	Pomiar nr 4			Średnia z 9 pomiarów	Objętość peletów drzew		
	Min.	Śred.	Maks.		25%	50%	75%
O <sub>2</sub> , %	6,8	11,1	14,1	11,9 ± 0,9	16,3	16,3	15,1
CO (10%O <sub>2</sub> ), mg/m <sup>3</sup>	3522	5774	9763	6477 ± 933	2153	1683	966
NO (10%O <sub>2</sub> ), mg/m <sup>3</sup>	206	372	483	372 ± 35	156	138	127
NO <sub>x</sub> (10%O <sub>2</sub> ), mg/m <sup>3</sup>	317	571	740	571 ± 53	239	212	195
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> * (10%O <sub>2</sub> ), mg/m <sup>3</sup>	39	123	320	159 ± 62	0	0	0
Pył, mg/m <sup>3</sup>		27		37 ± 6	nie mierz	nie mierz	nie mierz
Temperatura spalin, °C	280	314	353	302 ± 28	240	240	256
Temp. w kom. spal., °C	639	702	763	686 ± 58	791	788	842
Moc kotła, kW	9,5	10,2	10,9	8,8 ± 1,4	9,4	9,8	10,3
Współ. nadmiaru. pow.	1,5	2,2	3,1	2,7 ± 0,5	4,5**	4,5**	3,6**
Strata wylotowa, %	17	21	26	23 ± 3	32	32	27

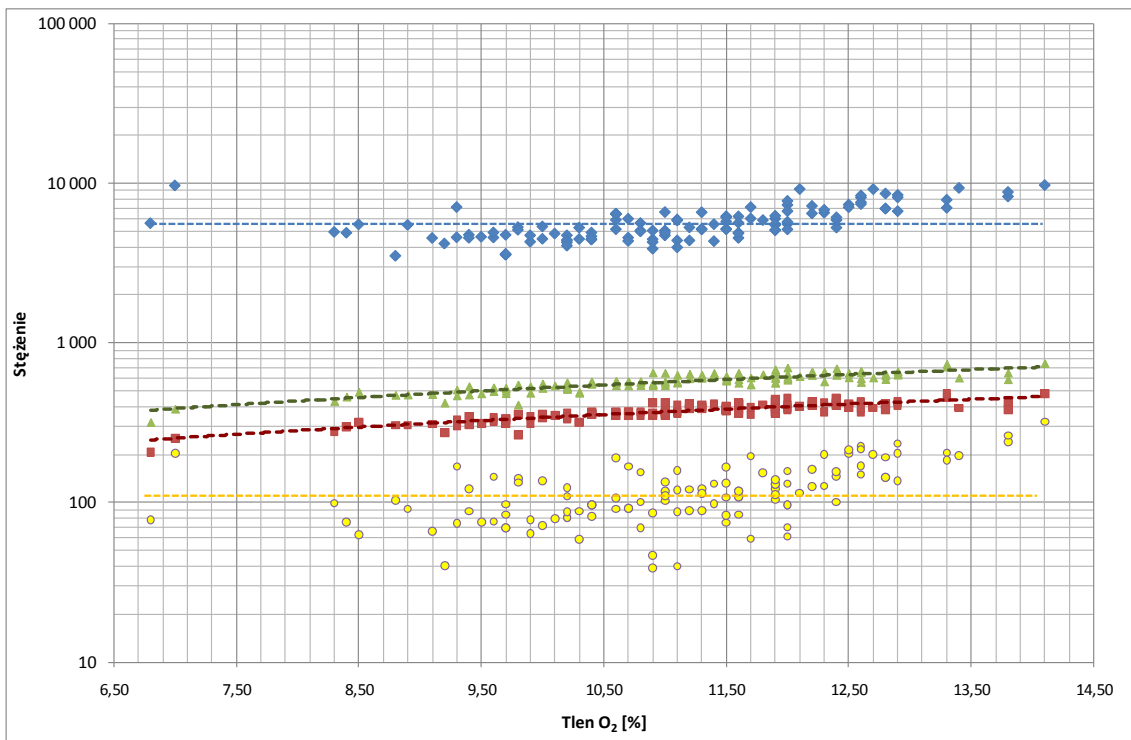
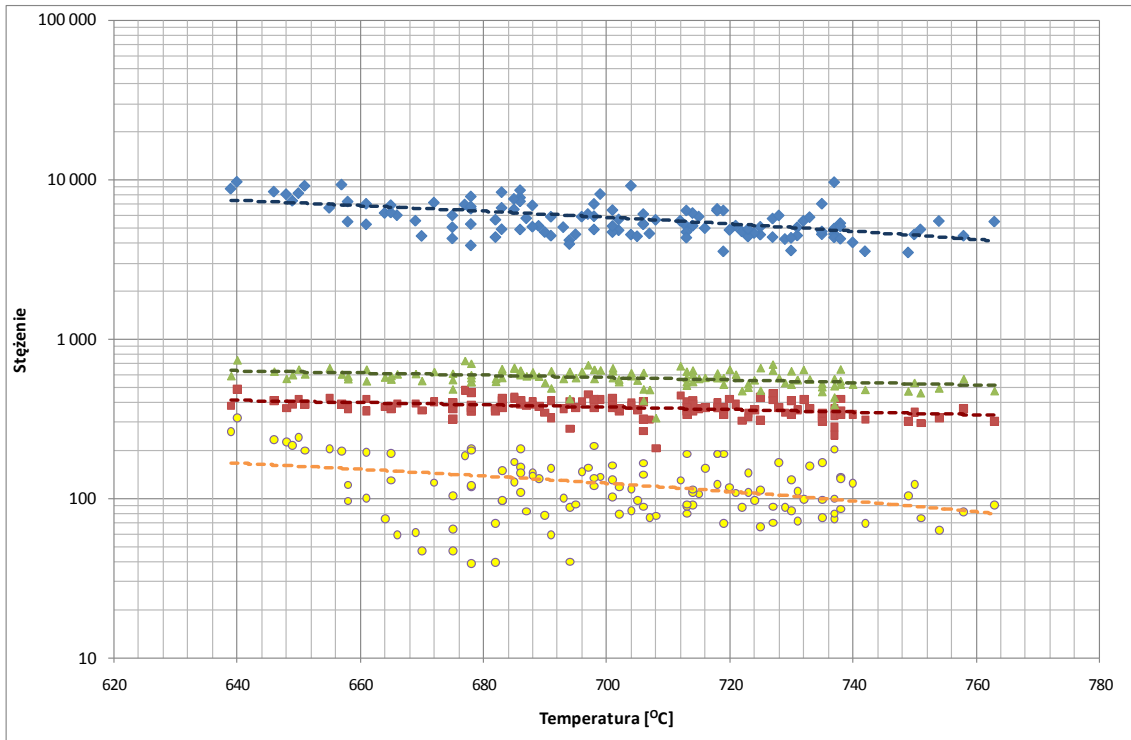
\* w przeliczeniu na CH<sub>4</sub>

\*\* bardzo duży współczynnik nadmiaru powietrza przy dużym ciągu kominowym w temperaturze powietrza -15°C (pozostałe pomiary wykonano latem w temperaturze około 20°C)

Zbyt duża ilość powietrza (brak możliwości regulacji) skutkowałą dużą stratą wylotową. Kocioł posiada poziomy wymiennik ciepła, na którym osadzał się pył. W związku z tym zmniejszała się sprawność cieplna kotła oraz pomierzone stężenie pyłu w kominie. Sprawność cieplną kotła 63% wyznaczono dla całego okresu badań (9 h) jako stosunek ilości ciepła przekazanego wodzie do iloczynu masy paliwa i wartości opałowej. Stężenie CO (tabela 1) jest wysokie, ale poniżej wartości dopuszczalnej [9]. Wartości dopuszczalne [9] określane są w zależności od uzyskiwanej przez kocioł sprawności cieplnej. Znacznie niższe stężenie CO, poniżej 700 mg/m<sup>3</sup> (10% O<sub>2</sub>) przy sprawności cieplnej 83% [10], uzyskano w tym palniku spalając pelety drzewne. Analizując 4. godzinę badań (rys. 6), stwierdzono spadek stężenia CO i C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> ze wzrostem temperatury w komorze spalania. Stężenia tlenków azotu są na podobnym poziomie, a nawet nieznacznie maleją (rys. 6). Wzrost temperatury jest tu około 100°C, większy wpływ może mieć więc mięknięcie popiołu, które może wyłączać ze spalania część paliwa. Zaobserwowano natomiast wzrost stężeń tlenków azotu ze wzrostem stężenia tlenu, a stężenia CO i C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> nie zmieniają się widocznie (rys. 6). Przy analizie w ujęciu wartości średnich z kolejnych godzin pomiaru (rys. 7), zależności stężeń zanieczyszczeń od temperatury w komorze spalania i stężenia tlenu nie są tak wyraźne, prawdopodobnie ze względu na zakłócenia procesu spalania, spowodowane mięknięciem popiołu.

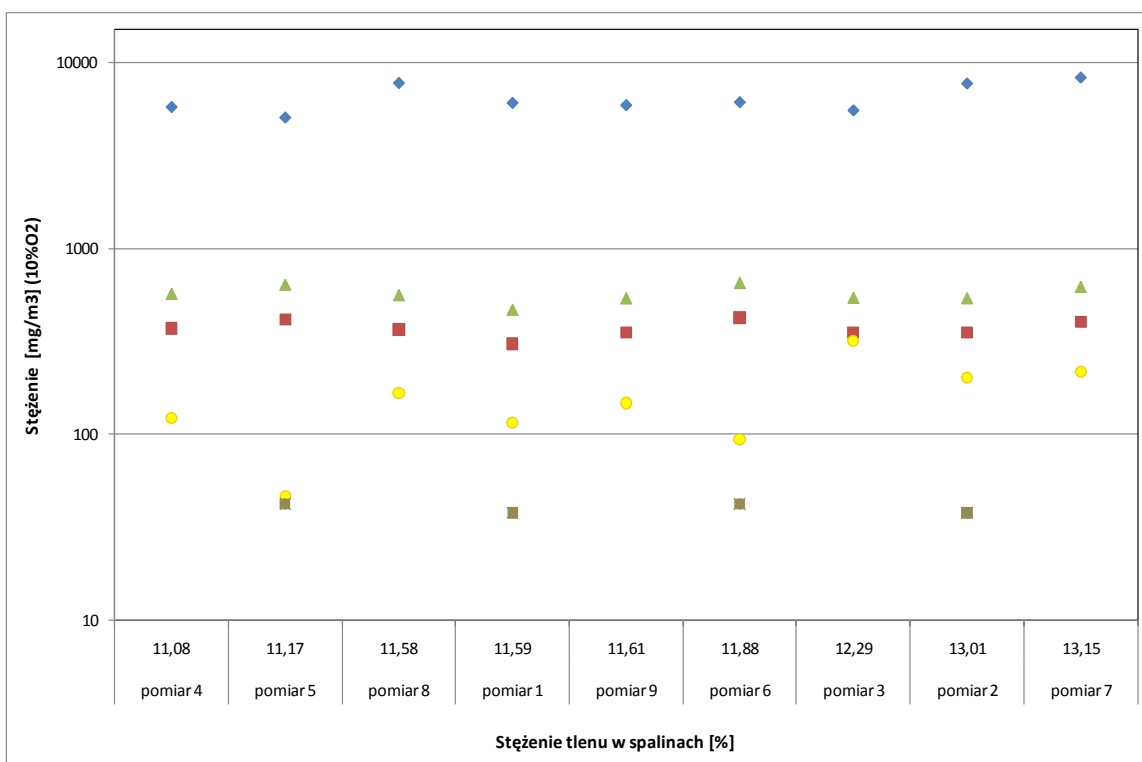
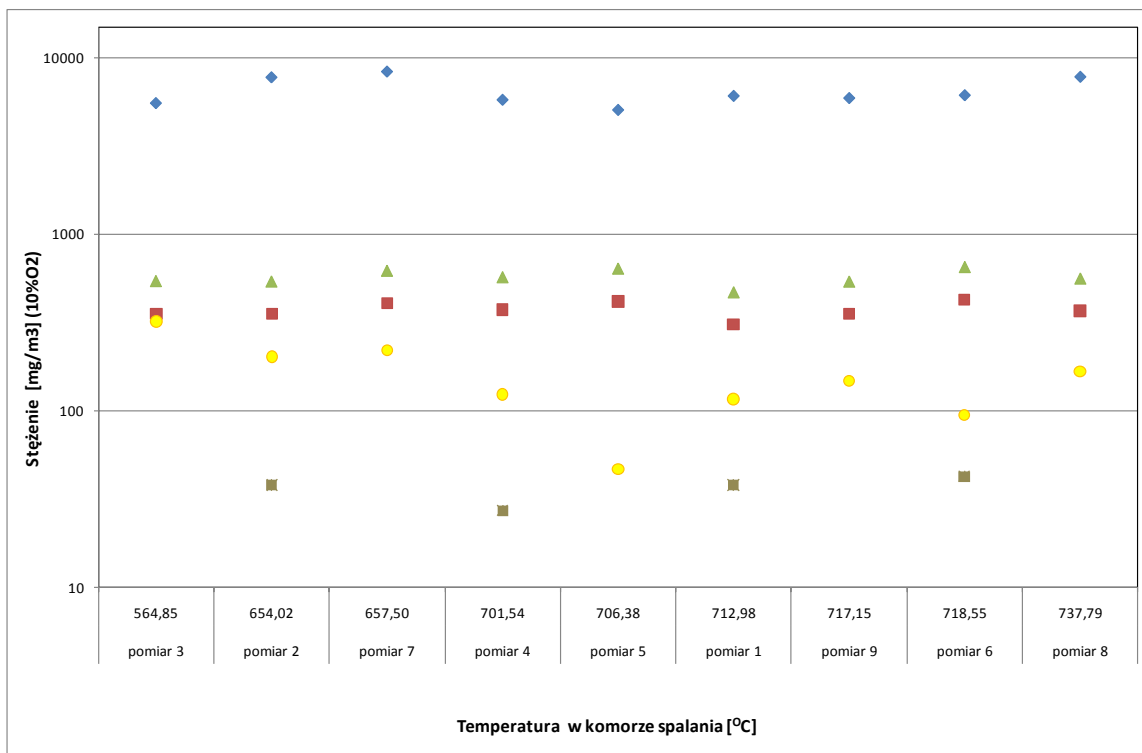


Rys. 5. Parametry pomiaru w 4. godzinie badań (pomiar 4, tabela 1)



◆ CO [mg/m<sup>3</sup>] (10%O<sub>2</sub>)    ■ NO [mg/m<sup>3</sup>] (10%O<sub>2</sub>)    ▲ NO<sub>x</sub> [mg/m<sup>3</sup>] (10%O<sub>2</sub>)    ● CH<sub>4</sub> [mg/m<sup>3</sup>] (10%O<sub>2</sub>)

Rys. 6. Zależność stężeń zanieczyszczeń od temperatury w komorze spalania i stężenia tlenu; 4. godzina badań (pomiar 4)



◆ CO [mg/m3] (10%O2)    ■ NO [mg/m3] (10%O2)    ▲ NOx [mg/m3] (10%O2)    ● CH4 [mg/m3] (10%O2)    ■ Pyt [mg/m3]

Rys. 7. Zależność stężeń zanieczyszczeń od temperatury w komorze spalania i stężenia tlenu; wartości średnie dla kolejnych godzin pomiarów



Oszacowano wskaźniki emisji zanieczyszczeń. Objętość powietrza i spalin z 1 kg paliwa w warunkach stechiometrycznych obliczono w oparciu o wzory 1 i 2 [11], w zależności od wartości opałowej, a w warunkach rzeczywistych również w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza (3):

$$V_{ps}^t = 0,99 \cdot \frac{Q_i^r}{4186,8} + 0,126 \quad (1)$$

$$V_s^t = 0,99 \cdot \frac{Q_i^r}{4186,8} + 1,126 \quad (2)$$

$$V_s = V_s^t + (\lambda - 1) \cdot V_{ps}^t \quad (3)$$

gdzie:  $Q_i^r$  – wartość opałowa drewna, kJ/kg

$V_s^t$  – objętość spalin w warunkach stechiometrycznych ( $\lambda = 1$ ) z 1 kg paliwa,  $m^3_n/kg$

$V_{ps}^t$  – objętość powietrza w warunkach stechiometrycznych ( $\lambda = 1$ ) z 1 kg paliwa,  $m^3_n/kg$

$V_s$  – objętość spalin w warunkach rzeczywistych ( $\lambda \neq 1$ ) z 1 kg paliwa,  $m^3_n/kg$

$\lambda$  – współczynnik nadmiaru powietrza.

Emisję z 1 kg paliwa obliczono tu jako iloczyn objętości spalin z 1 kg paliwa i średniej dla badań wartości stężenia, w warunkach normalnych, przy rzeczywistym stężeniu tlenu (11,9%). Wskaźniki emisji dla CO, NO, NO<sub>x</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> i pyłu, wyniosły odpowiednio: 5,315; 0,306; 0,469; 0,130; 0,030 g/MJ.

## 5. Wnioski

W palniku korytkowym (szufladowym) dostosowanym do peletów drzewnych, bez regulacji ilości powietrza, zastosowano pelety z łusek słonecznika. Nie udało się całkowicie uniknąć mięknięcia popiołu, moc i sprawność cieplna kotła była mała, wysokie stężenie CO, lecz poniżej wartości dopuszczalnej. Znaczne obniżenie stężenia CO i C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> uzyskano w procesie współspalania z peletami drzewnymi

## Literatura

1. Knaus H., Richter S., Unterberger S., Snell U., Maier H., Hein K.R.G.: On the application of different turbulence models for the computation of flow and combustion process in small scale wood heaters. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2000, vol. 21, 99-108
2. Werther J., Saenger M., Hartge E. U., Ogada T., Siagi Z.: Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2006, vol. 26, 1-27,
3. Rybak W.: Spalanie i współspalanie biopaliw stałych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006
4. Ohman M., Boman C., Hedman H., Nordin A., Bostrom D.: Slagging tendencies of wood pellet ash during combustion in residential pellet burner. *Biomass and Bioenergy*, 2004, vol. 27, 585-596

5. Johansson Linda.S., Leckner B., Gustovsson L., Cooper D., Tullian C., Potter A.: Emission characteristic of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. *Atmospheric Environment* , 2004, vol. 38, 4183-4195
6. Kjallstrand J., Olsson M.: Chimney emission from small-scale burning of pellets and fuelwoods- examples referring to different combustion appliances. *Biomass& Bioenergy*, 2006, vol. 27, 557-561
7. EN 12048: Solid fertilizers and liming materials-Determination of moisture content- Gravimetric method by drying at (105 +/- 2°C), December 1999
8. PN-81/G-04513: Paliwa stałe. Oznaczanie ciepła spalania i obliczanie wartości opałowej
9. PN-EN 303-5: Kotły grzewcze na paliwa stałe z ręcznym i automatycznym zasypem paliwa o mocy nominalnej do 300 kW. Terminologia, wymagania, badania i oznakowanie. 2002
10. Juszcak M.: Investigations of heat station with the boiler utilizing pellets burner. *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, 2008, vol. 8, 63-68
11. Kruczek S.: Kotły. Konstrukcje i obliczenia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.