



## Concentrations of carbon monoxide and nitrogen oxides (NO, NO<sub>x</sub>) from a 25 kW boiler supplied periodically and continuously with wood pellets

Marek JUSZCZAK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Środowiska, Zakład Ogrzewnictwa, Klimatyzacji i Ochrony Powietrza, ul. Piotrowo 3a, Poznań, tel. 61 6652 524, fax 61 6652439, e-mail: marekjuszczak8@wp.pl

### Abstract

The impact of periodic and continuous feeding mode on the carbon monoxide (CO) and nitrogen oxides (NO, NO<sub>x</sub>) concentration values in the flue gas downstream the boiler was analyzed during firing 4,6 and 8 kg/h of wood pellets in an overfeed- channel furnace. Significant increase of CO concentration during periodic feeding mode in comparison to continuous feeding mode, was observed only in the case of very long stand-by period. In periodic fuel supply with constant air stream, during stand-by period in fuel feeding, the temperature in combustion chamber decreased, however oxygen concentration increased. These factors, that usually influence nitrogen oxide concentration compensated mutually to a big extent. Therefore, the concentration of nitric oxide (NO) and nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) mainly depended on the stream of nitrogen in the fuel supplied to the furnace, as temperature in the combustion chamber was relatively low (below 700°C). Investigations were performed in the full-scale heat station in conditions similar to these which appeared in reality.

**Keywords:** wood, emission, combustion, boiler, heat station

### Streszczenie

Stężenia tlenku węgla i tlenków azotu (NO, NO<sub>x</sub>) z kotła o mocy 25 kW zasilanego peletami drzewnymi w sposób periodyczny i ciągły

Badano wpływ periodycznego i ciągłego zasilania peletami drzewnymi kotła z paleniskiem nasuwowym-korytkowym, na stężenia tlenku węgla i tlenków azotu (NO i NO<sub>x</sub>) w spalinach. Stwierdzono, że stężenie tlenku węgla dla zasilania periodycznego rośnie znacząco w stosunku do zasilania ciągłego dopiero dla bardzo długich przerw w dozowaniu peletów. W czasie dozowania periodycznego paliwa (przy stałym strumieniu powietrza), temperatura w komorze spalania obniżała się a stężenie tlenu rosło. Te czynniki, które wpływały na zmniejszenie i wzrost stężenia tlenków azotu, wzajemnie się kompensowały w dużym stopniu. Stężenia tlenków azotu zależały więc głównie od strumienia azotu dostarczanego do paleniska w paliwie, dlatego że temperatura w komorze spalania była względnie niska (poniżej 700°C). Badania były prowadzone w kotłowni w pełnej skali technicznej, w warunkach zbliżonych do rzeczywistej eksploatacji.

**Słowa kluczowe:** drewno, emisja, spalanie, kocioł, kotłownia,

### 1. Wstęp

W ostatnim dziesięcioleciu wzrosło zainteresowanie spalaniem biomasy w związku z ociepleniem klimatu. Uważa się, że istotnym czynnikiem wpływającym na to ocieplenie jest wzrost stężenia dwutlenku węgla w atmosferze i że spalanie biomasy nie powoduje wzrostu tego stężenia, bowiem rośliny w czasie spalania wydzielają tylko tyle dwutlenku węgla ile pochłonęły w procesie asymilacji.

Kotły grzewcze małej mocy na paliwo stałe (poniżej 50kW) emitują zbyt duże ilości produktów niepełnego spalania (tlenku węgla, węglowodorów, sadzy) w przeliczeniu na jednostkę wytwarzanego ciepła w stosunku do kotłów o mocy powyżej 1 MW, bowiem ściany komory spalania są jednocześnie powierzchniami wymiany ciepła. Spaliny dopływają w krótkim czasie do tych chłodnych powierzchni i tam proces spalania jest hamowany, węglowodory mogą nie zostać utlenione. Problem emisji produktów niepełnego spalania występuje szczególnie wyraźnie właśnie podczas spalania biomasy w kotłach grzewczych małej mocy. W pierwszej fazie spalania węgla kamiennego wydziela się tylko ok. 20% wagowo części lotnych, gdy w czasie

spalania biomasy 70- 80% [1]. Ta duża ilość gazów bardzo szybko przepływa przez relatywnie małą (w stosunku do kotłów o mocy powyżej 1MW) komorę spalania docierając bardzo szybko do powierzchni wymiany ciepła. W kotłach o mocy powyżej 1 MW komora spalania jest długa, najczęściej ma trzy ciągi, wyłożona jest ceramiką dla utrzymania wysokiej temperatury. W przypadku kotłów grzewczych małej mocy, komora spalania jest mała, aby kocioł był mały i tani. Szacuje się [2], że w Niemczech w 2000 roku, udział palenisk małej mocy zasilanych drewnem w wytwarzaniu ciepła był ok. 1% a w emisji produktów niezupełnego spalania 16 do 40%. Od tego czasu sytuacja w Niemczech uległa poprawie, bo wzrosła liczba nowoczesnych kotłów, ale liczby te wskazują na skalę problemu. W Polsce wśród kotłów grzewczych małej mocy, zasilanych drewnem przeważają tanie kotły o prostej, przestarzałej konstrukcji, emitujące duże ilości produktów niezupełnego spalania.

Drewno było pierwszym paliwem człowieka, ale było spalane głównie w postaci polan, co wymagało ręcznej obsługi, otwierania częstego komory spalania, przez co ona się wychładzała. Rosło wtedy stężenie produktów niezupełnego spalania w spalinach. Kotły na polana drzewne pracujące w kotłowni, są więc często źródłem znacznej emisji tlenku węgla, szczególnie gdy nie posiadają układu automatycznej regulacji powietrza do spalania z sondą tlenową umieszczoną w spalinach. W ostatnich latach bardzo popularne stały się pelety drzewne, bowiem mają gęstość podobną do drewna, ale dzięki małym wymiarom można zautomatyzować podawanie paliwa do kotła i nie trzeba otwierać komory spalania do załadunku paliwa, więc stężenie tlenku węgla jest przeważnie znacznie niższe niż w przypadku spalania polan drzewnych.

Szczególnie popularne są paleniska na pelety drzewne w kotłach grzewczych w Szwecji. Zastąpiły one w kotłach paleniska na olej opałowy, gdyż cena oleju bardzo wzrosła w ostatnim dziesięcioleciu. Również w Niemczech, Austrii i ostatnich latach także w Polsce notuje się spore zainteresowanie kotłami na pelety drzewne. Stosowane są w Polsce najczęściej paleniska nasuwowe- korytkowe z poziomym dozowaniem peletów do paleniska i paleniska podsuwowe-retortowe. Dozowanie peletów do paleniska jest najczęściej periodyczne, tzn. ustala się dla wymaganej mocy kotła czas podawania peletów i czas przerwy w dozowaniu, przy stałych obrotach śruby podajnika. Te paleniska w Polsce nie są przeważnie wyposażone w automatyczną regulację powietrza do spalania z sondą tlenową umieszczoną w spalinach za kotłem. Strumień powietrza jest wtedy stały dla danej mocy kotła i ustala się go ręcznie. Taki sposób dozowania jest tańszy od dozowania ciągłego z płynną regulacją obrotów śruby podajnika. Jednak podczas przerwy w dozowaniu peletów, strumień powietrza się nie zmniejsza i z tego powodu temperatura w komorze spalania obniża się, co wpływa na wzrost stężenia tlenku węgla. Jednocześnie wzrasta stężenie tlenu. Polska- europejska norma [3] jest liberalna i dopuszcza stosunkowo duże stężenie ( $3000 \text{ mg/m}^3$  odniesione do 10% stężenia tlenu w spalinach) tlenku węgla w spalinach kotłów grzewczych o mocy mniejszej niż 300 kW. Najnowocześniejsze paleniska na pelety drzewne z sondą tlenową i z ciągłym podawaniem paliwa, charakteryzują się stężeniem tlenku węgla na poziomie  $10- 50 \text{ mg/m}^3$  [4, 5] (są to jednak badania wykonane w warunkach stacjonarnych na stanowiskach badawczych, przy wysokiej mocy cieplnej). W przypadku periodycznego podawania peletów, bez regulacji strumienia powietrza z sondą tlenową, w kotłowni w warunkach zbliżonych do rzeczywistych uzyskuje się często stężenia w granicach  $300- 800 \text{ mg/m}^3$  [6].

## 2. Cel badań

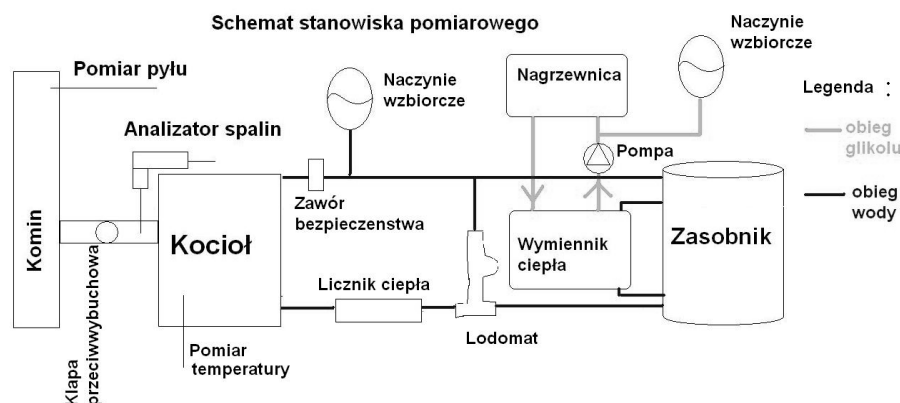
Celem było stwierdzenie czy podawanie periodyczne peletów powoduje znaczący wzrost stężenia tlenku węgla w stosunku do podawania ciągłego.

## 3. Stanowisko do badań, program badań

Schemat stanowiska do badań przedstawia rysunku 3.1.

Stanowisko do badań to kotłownia grzewcza w pełnej skali technicznej, w której zainstalowany jest kocioł o mocy ok. 25 kW z paleniskiem nasuwowym-korytkowym na pelety drzewne. Kocioł ten współpracuje z zasobnikiem ciepła o pojemności 900 l. za pośrednictwem urządzenia pompowego, typu Laddomat 21. Składa się ono z pompy i trzech zaworów termicznych, które otwierają się i zamykają automatycznie w zależności od temperatury dopływającej wody, umożliwiając lub uniemożliwiając przepływ wody w różnych rurociągach. Urządzenie to uruchamia przepływ wody przez kocioł dopiero, gdy temperatura wody w kotle osiągnie  $64^\circ\text{C}$ . Następuje wtedy przepływ wody jedynie przez kocioł i urządzenie pompowe Laddomat 21, z pominięciem zasobnika ciepła. Gdy temperatura wody osiągnie wartość  $72^\circ\text{C}$ , wtedy woda pobierana jest także z zasobnika, ale w takiej ilości, aby woda na wlocie do kotła miała temperaturę co najmniej  $64^\circ\text{C}$ . Chodzi o to, aby temperatura ścian komory spalania (które są jednocześnie powierzchniami wymiany ciepła), była możliwie jak najwyższa, by proces spalania na ścianach komory spalania nie był hamowany. Ciepło z kotła lokowane

w zasobniku ciepła jest przekazywane dalej do grzejników i zasobników ciepła w domku badawczym za pośrednictwem sieci cieplnej i węzła cieplnego. Może być także przekazywane do atmosfery za pomocą nagrzewnicy wentylatorowej (spełniającej tutaj rolę chłodnicy) o regulowanej wydajności cieplnej. Daje to możliwości symulowania zmiennego zapotrzebowania ciepła odbiorców. Badane są więc stężenia zanieczyszczeń z kotłowni zasilanej pelletami drzewnymi, pracującej w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

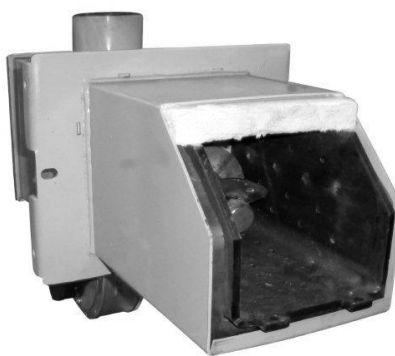


Rys. 3.1. Schemat stanowiska badawczego- kotłownia zasilana biomasą

Na rys. 3.2 przedstawiony jest widok stanowiska badawczego: zasobnik na pelety, przenośnik śrubowy, palenisko i kocioł, analizator spalin, zasobnik ciepła a na rys. 3.3 pokazana jest otwarta dla demonstracji komora spalania z paleniskiem. Pelety podawane są przenośnikiem śrubowym z zasobnika do paleniska. Palenisko posiada swój własny poziomy podajnik śrubowy dostarczający pelety do strefy spalania. Palenisko zaopatrzone jest w elektryczny zapłon. Wentylator powietrza do spalania ma regulowane ręcznie obroty, których wartość ustala się na początku procesu spalania w zależności od strumienia peletów. Fabrycznie zamontowane jest podawanie periodyczne peletów do paleniska. Ustala się ręcznie czas podawania peletów i czas przerwy w podawaniu oraz strumień powietrza do spalania, w dowolny sposób, ale taki, aby uzyskać wymagana wydajność cieplną kotła. Prędkość śruby podajnika peletów jest stała. Producent paleniska proponuje nastawy w zależności od oczekiwanej mocy cieplnej kotła. Są one właściwe dla peletów z drewna liściastego. Dla peletów z drewna iglastego nie są już one odpowiednie, bowiem drewno iglaste spala się szybciej i intensywniej ze względu na zawartość żywicy. Dla przeprowadzenia badań i wprowadzenia ciągłego podawania peletów zastosowano silnik większej mocy i wprowadzono płynną regulację obrotów instalując tzw. falownik. Badania stężenia tlenku węgla, tlenku azotu NO oraz tlenków azotu NO<sub>x</sub> (wyliczanych przez analizator spalin) wykonano dla strumienia peletów 4,0 kg/h podczas ciągłego dozowania peletów i podczas badania periodycznego. Czas każdego trybu podawania peletów trwał nieprzerwanie 5 godzin. Stężenie gazów w spalinach za kotłem mierzono analizatorem spalin Typu VARIO PLUS firmy MRU, Niemcy. Stężenie tlenu i tlenku azotu NO mierzono metodą elektrochemiczną. Stężenie NO<sub>x</sub> wyliczał analizator jako stężenie NO<sub>2</sub>, zakładając, że tlenek azotu NO utleni się w atmosferze do NO<sub>2</sub>. Stężenie tlenku węgla i węglowodorów mierzono w podczerwieni. Analizator mierzył także temperaturę spalin za kotłem oraz wyliczał stratę kominową. Temperaturę w komorze spalania mierzono ok. 0,3 metra nad płomieniem termoparą PtRhPt w osłonie ceramicznej (dla zmniejszenia wpływu promieniowania). Temperatura w palenisku w strefie płomienia była ok. 200°C wyższa. Stwierdzono to kontrolnymi pomiarami za pomocą pirometru. Niestety bezpośredni pomiar w strefie płomienia nie był możliwy, gdyż wymagało to dokonanie zmian w konstrukcji kotła, na co nie zgodził się producent. Mierzone w sposób ciągły wartości parametrów przesyłano on-line do komputera i rejestrowano co 2 sekundy, a uśredniano co 10 sekund i analizowano na wykresach. Dla stężeń zanieczyszczeń gazowych (CO, NO, NO<sub>x</sub>) obliczono przedział niepewności, tab.5.1 dla 95% poziomu ufności. Stężenie pyłu mierzono pyłomierzem grawimetrycznym z izokinetycznym zassaniem gazów. Mierzono także za pomocą ultradźwiękowego licznika ciepła strumień ciepła przekazywany od spalin do wody kotłowej, moc cieplną kotła i wartości te były przekazywane także on-line w ten sam sposób do komputera i tak samo opracowywane, (ale nie obliczano przedziału niepewności). Strumień masy peletów mierzono metodą wagowa przy użyciu wagi Sartoriusa. Mierzono wartość opałową peletów metodą kalometryczną, a sprawność cieplną określano metodą bezpośrednią jako stosunek ilości ciepła przekazywanego wodzie kotłowej, do iloczynu masy paliwa i wartości opałowej. Otrzymane wartości konfrontowano ze sprawnością (wyliczana w oparciu o stratę kominową) i szacowane pozostałe straty cieplne.



Rys. 3.2. Widok stanowiska badawczego



Rys. 3.3. Palenisko nasuwowe-korytkowe, widok paleniska w komorze spalania

Tabela 3.1. Parametry dozowania peletów do paleniska

Strumień masy spalanego paliwa [kg/h]	Sposób podawania paliwa	Czas podawania [s] : czas przerwy [s]
4,0	ciągły	
	przerywany	30:45
		40:60
		50:75

Dla strumienia peletów 4 kg/h zastosowano 30% maksymalnego strumienia powietrza. Wielkość tą dobrano empirycznie, aby uzyskać najmniejsze stężenie tlenu węgla, obserwując wskazania analizatora gazów w zakresie stężenia tlenu węgla oraz przez wziernik płomień w komorze spalania. Oczywiście producenci kotłów proponują odpowiednie nastawy czasu pracy i czasu przerwy oraz wielkość strumienia powietrza do spalania dla oczekiwanej mocy kotła, ale są one opracowane z reguły dla dobrej jakości peletów w 100% z drewna liściastego. Dla innych peletów te nastawy nie są adekwatne, tzn. nie zawsze prowadzą do uzyskania możliwie najmniejszego stężenia tlenu węgla.

#### 4. Material

Do badań wykorzystano pelety drzewne (70% drewno iglaste, 30% drewno liściaste). Wymiary: średnica 6 mm, długość do 40 mm, rys.4.1.



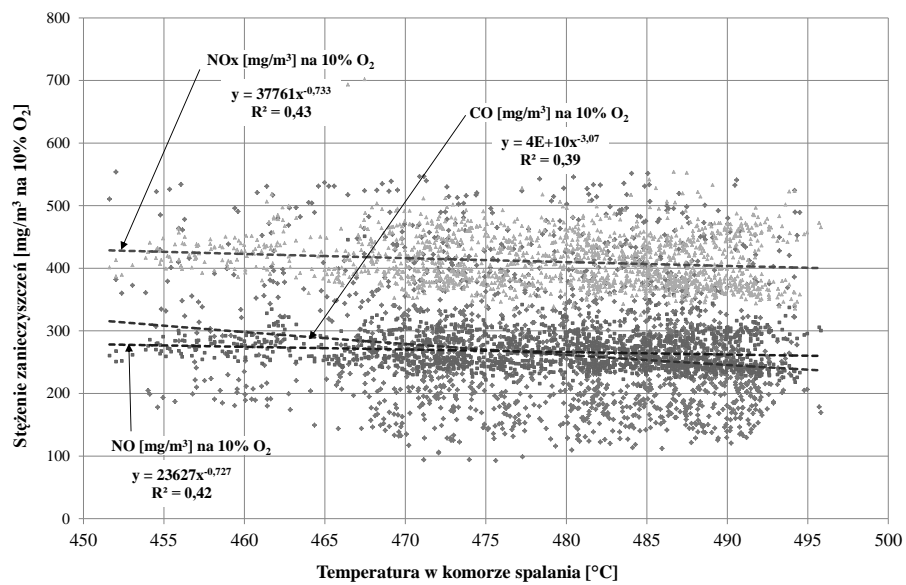
Rys. 4.1. Pelety drzewne. Parametry techniczne peletu: wilgotność 10%, popiół, 0,7%, wartość opałowa 18,5 MJ/kg

#### 5. Wyniki badań

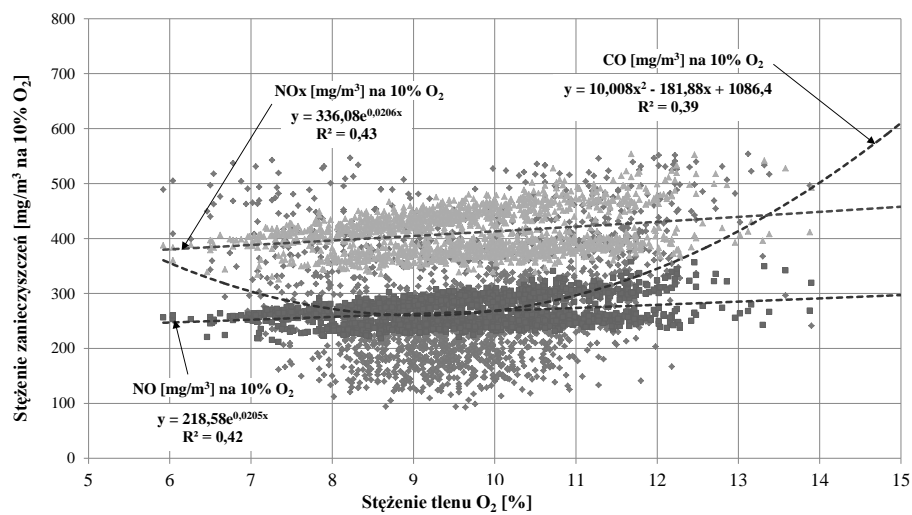
Wyniki badań przedstawiono w tabeli 5.1 i na rysunkach 5.1 do 5.4. Rysunki 5.1- 5.4 uzyskano zbierając jednocześnie w pary liczby: stężenie tlenku węgla lub tlenków azotu oraz temperaturę w komorze spalania lub stężenie tlenu.

Tabela 5.1. Średnie wartości charakterystyczne zmierzone dla wszystkich sposobów podawania paliwa wg tabeli 3.1

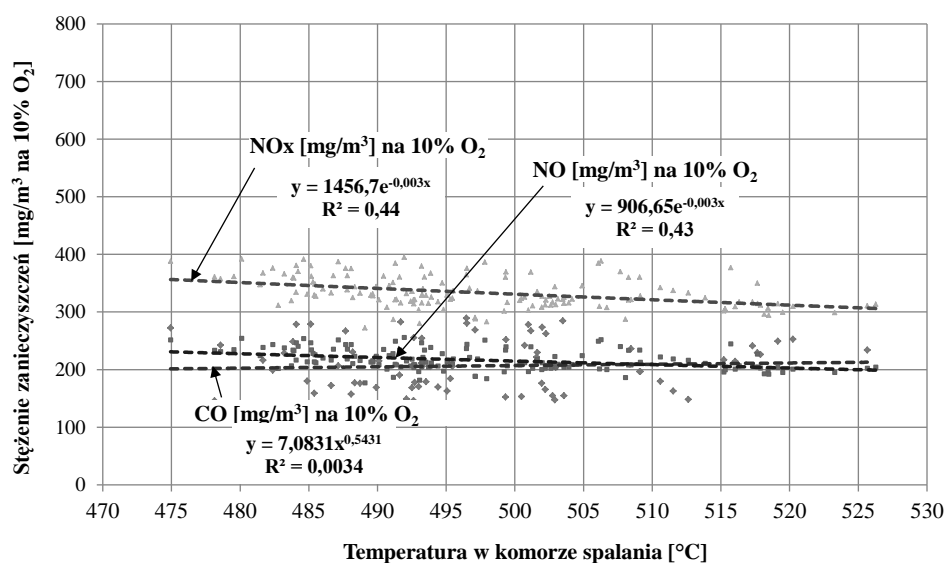
Strumień masy paliwa [kg/h]	Sposób podawania paliwa [-]	Czas podawania: czas przerwy [s]	Stężenie zanieczyszczeń			Temperatura w komorze spalania [°C]	Stężenie O <sub>2</sub> [%]	Lambda [-]	Moc [kW]	Sprawność [%]
			CO	NO	NO <sub>x</sub>					
			[mg/m <sup>3</sup> ] na 10%O <sub>2</sub>							
4,0	ciągły		312 ±32	252 ±12	390 ±19	479	10	1,8	11,8	85
	przerywany	30:45	320 ±31	232 ±20	359 ±31	560	9	1,7	10,1	85
		40:60	670 ±85	206 ±15	319 ±23	520	11	2,0	10,6	84
		50:75	1604 ±550	193 ±16	300 ±25	490	11	2,0	8,8	82



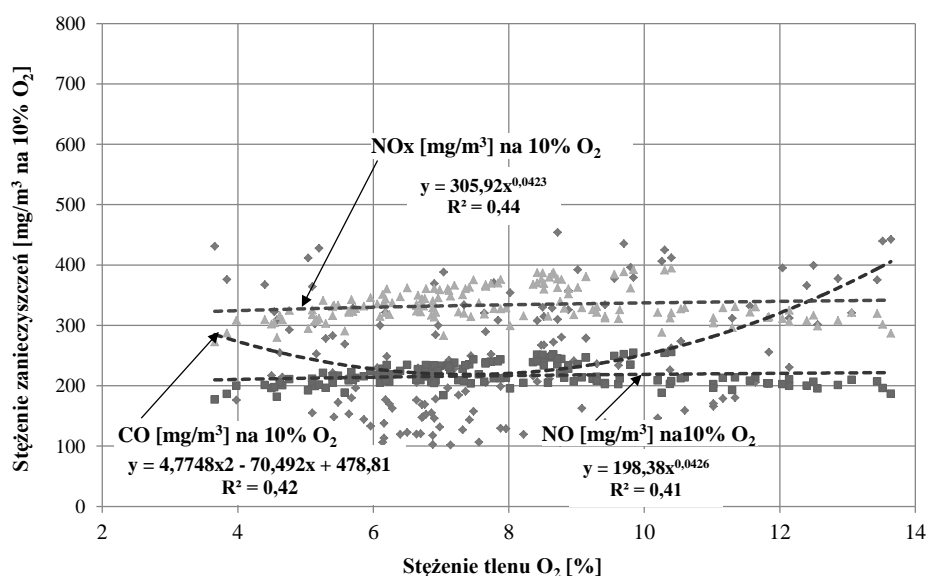
Rys. 5.1. Stężenie tlenku węgla CO i tlenków azotu NO, NOx w funkcji temperatury, dozowanie ciągłe, 4 kg/h



Rys. 5.2. Stężenie tlenku węgla CO i tlenków azotu NO, NOx w funkcji stężenia tlenu, dozowanie ciągłe, 4 kg/h



Rys. 5.3. Stężenie tlenku węgla CO i tlenków azotu NO i NOx w funkcji temperatury, dozowanie periodyczne 4 kg/h, czas podawania 50 s, czas przerwy 75s



Rys. 5.4. Stężenie tlenku węgla CO i tlenków azotu NO i NOx w funkcji stężenia tlenu, dozowanie periodyczne 4 kg/h, czas podawania 50 s, czas przerwy 75s

## 6. Analiza wyników

Stężenie tlenku węgla dla dozowania periodycznego było znacznie większe dopiero dla nastawy z dużą przerwą w dozowaniu peletów, tabela 5.1. Dla wszystkich nastaw, przypadków przedstawionych w tabeli 2 uzyskano względnie wysoką sprawność cieplną powyżej 80 %. Przy dozowaniu periodycznym wraz ze wzrostem długości przerwy w podawaniu peletów obserwuje się znacznie większy rozrzut wartości stężenia tlenku węgla, niż przy dozowaniu ciągłym, bowiem przy stałym strumieniu powietrza, nie zmniejszonym w czasie przerwy w periodycznym dozowaniu peletów, bardziej zmieniają się temperatura w komorze spalania i stężenie tlenu niż przy dozowaniu ciągłym.

Na rysunkach 5.2 i 5.4 obserwuje się spadek wartości stężenia tlenku węgla, przy wzroście stężenia tlenu do pewnej wartości minimalnej, a przy dalszym wzroście stężenia tlenu, stężenie tlenku węgla maleje. Ta zależność

jest przedstawiana w wielu pracach, np. [7]. W analizowanym palenisku przy dozowaniu periodycznym peletów można przypuszczać, że na wzrost stężenia tlenu węgla powyżej wartości minimalnej ma także wpływ znaczne obniżenie temperatury w komorze spalania przy przerwie w dozowaniu peletów. Znalezienie wartości stężenia tlenu przy którym uzyskuje się najmniejsze wartości stężenia tlenu węgla będzie przydatne do ustalenia nastawy sondy tlenowej w przyszłych badaniach. Obserwuje się nieznaczny wzrost stężenia tlenków azotu NO i NO<sub>x</sub> wraz ze wzrostem stężenia tlenu rys. 5.2 i 5.4 natomiast nieznaczny spadek wartości tych stężeń wraz ze wzrostem temperatury w komorze spalania rys. 5.1 i 5.3. Dzieje się tak dlatego, gdyż wzrost tej temperatury spowodowany jest intensywniejszym spalaniem, a wtedy stężenie tlenu maleje. Zmniejszenie stężenia tlenu ma tutaj jak się okazuje większy wpływ na zmniejszenie stężenia tlenków azotu niż wzrost temperatury w komorze spalania na wzrost tych stężeń (tlenków azotu NO, NO<sub>x</sub>). Stężenia NO<sub>x</sub> nie przekroczyły wartości 400mg/m<sup>3</sup> (odniesionych do 10% stężenia tlenu w spalinach), a więc palenisko i kocioł spełniają wymogi uzyskania tzw. atestu ekologicznego [8].

Nie stwierdzono występowania węglowodorów w spalinach, zaobserwowano jednak sadzę w czopuchu. Ponieważ ściany komory spalania są jednocześnie ściankami wymiennika ciepła, mogło więc być tak, że powstające węglowodory ulegały redukcji na chłodnych powierzchniach komory spalania. Wykonano wstępne, szacunkowe pomiary stężenia pyłu i określono stężenie na poziomie 35 [mg/m<sup>3</sup>], które było znacznie niższe od stężeń dopuszczalnych na poziomie 150 [mg/m<sup>3</sup>] (przy zawartości tlenu 10%). [3]

## 7. Posumowanie

Możliwe jest stosowanie periodycznego dozowania peletów z mieszaniny drewna iglastego i liściastego zamiast dozowania ciągłego bez wzrostu stężenia tlenu węgla (powyżej wartości dopuszczalnej 3000 mg/m<sup>3</sup>, dla poziomu 10% zawartości tlenu w spalinach [3]). Wystarczy stosować relatywnie krótkie przerwy w dozowaniu peletów, wyznaczone w czasie badań. W związku z tym, stosowanie podawania ciągłego zamiast periodycznego, nie jest uzasadnione w przypadku badanego paleniska nasuwowego-korytkowego, bowiem zwiększa koszt zakupu kotła.

## Literatura

1. Kordylewski W., Spalanie i paliwa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2000.
2. Knaus H., Richter S., Unterberger S., Snell U., 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*, 21, 2000, 99-105.
3. 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, PKN, 2002.
4. FJBLT Wieselburg, Test Report 223/08 for pellets heating boiler: Pellets Unit ETAPU15, [http://www.bl.bmlfuw.gv.at/pruefber/g2008223\\_E.pdf](http://www.bl.bmlfuw.gv.at/pruefber/g2008223_E.pdf). 2009.
5. FJBLT Wieselburg, Test Report 213/09 for pellets heating boiler: Pellets Compact ETAPC 25, [http://www.bl.bmlfuw.gv.at/pruefber/g2009213\\_E.pdf](http://www.bl.bmlfuw.gv.at/pruefber/g2009213_E.pdf), 2010.
6. Juszczak M., 2011. Pollutant concentrations from deciduous wood fuelled heat stations. *Chemical and Process Engineering*, 32, 2011, 41-45.
7. Nussbaumer T., Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies and primary measures for emission reduction. *Energy and Fuels*, 17, 2003, 1510-1521,
8. Kubica K., Kryteria efektywności energetyczno-ekologicznej kotłów małej mocy i paliw stałych dla gospodarki komunalnej. Certyfikacja na znak bezpieczeństwa ekologicznego, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, 1999.