

## WPŁYW RECYRKULACJI SPALIN NA PROCES SPALANIA BIOMASY

Martin Polák, Pavel Neuberger

*Katedra Mechaniki i Budowy Maszyn, Uniwersytet Rolniczy w Pradze*

Kazimierz Rutkowski,

*Katedra Inżynierii Rolniczej i Informatyki, Akademia Rolnicza w Krakowie*

**Streszczenie.** W procesie spalania biopaliw, pochodzenia roślinnego pojawia się problem zwiększonej koncentracji tlenków azotu w odprowadzanych spalinach. Aby obniżyć zawartość tlenków azotu w spalinach kotłów wielkoprzemysłowych stosuje się recyrkulację spalin. Celem prowadzonych badań było sprawdzenie wymienionej technologii w kotłach małej mocy podczas procesu spalania biomasy. Przedmiotem badań był kocioł wodny o mocy 25 kW gdzie jako paliwo stosowano pelety z drewna o średnicy 8 cm oraz ziarno żyta. Uzyskane wyniki badań potwierdziły rozpatrywaną wyżej analogię. Najkorzystniejsze wyniki uzyskano przy recyrkulacji  $r = 0,3$  ze współczynnikiem nadmiaru powietrza  $\lambda = 1,3 \div 1,4$  przy spalaniu pelet z drewna, zaś  $\lambda = 1,5 \div 1,6$  w przypadku spalania ziarna żyta.

**Słowa kluczowe:** biomasa, spalanie, tlenek azotu, recyrkulacja spalin

### Wstęp

Działalność gospodarcza człowieka jest przyczyną wzrostu zawartości tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ) które stanowią zagrożenie dla środowiska naturalnego [Grzybek, 2006]. Z tego też względu w ostatnich latach wiele uwagi poświęcono zagadnieniu zmierzającemu do jego obniżenia. Pod ogólnym pojęciem tlenki azotu należy mieć na uwadze dwie jego formy – tlenek azotu ( $\text{NO}$ ) – bezbarwny gaz bez zapachu oraz dwutlenek azotu ( $\text{NO}_2$ ), który jest gazem o zabarwieniu czerwono brązowym o ostrym zapachu. Analizując pochodzenie tlenków azotu należy przyznać, że największym jego źródłem jest proces spalania.

Istnieje kilka metod pozwalających na obniżenie zawartości  $\text{NO}_x$  występujących w spalinach urządzeń energetycznych. Są to metody zmierzające do ograniczenia powstawania szkodliwych związków już w początkowym procesie spalania. Do nich należy stosowanie małego współczynnika nadwyżki powietrza, wielostopniowy proces spalania bądź też recyrkulacja spalin [Pałowski 2003, Swigoń 2002].

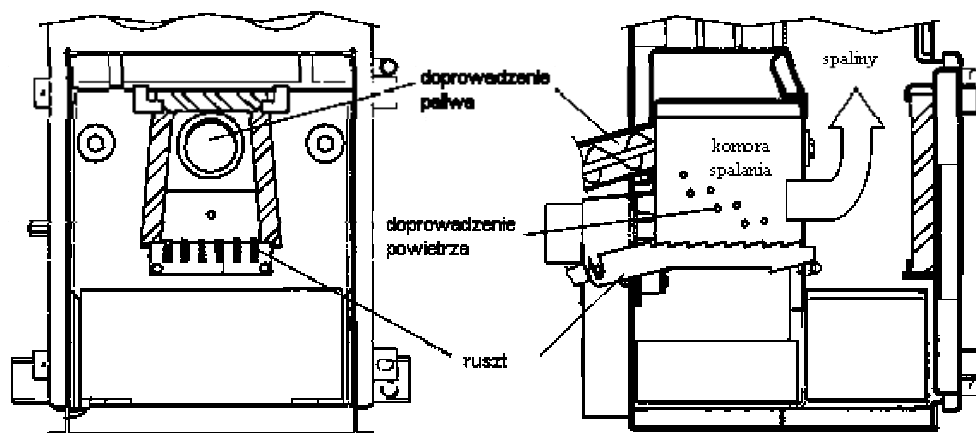
Najczęściej spotykanym sposobem w praktyce jest recyrkulacja spalin. Stosowanie tej zasady polega na tym, że część spalin odprowadzanych z kotła kierowana jest powtórnie do paleniska w postaci mieszaniny ze świeżym powietrzem. Tym sposobem dochodzi do obniżenia maksymalnych temperatur w palenisku oraz uzyskuje się mniejszą zawartość tlenu w podawanym powietrzu. Prowadzi to do ograniczonego utleniania azotu.

Celem prowadzonych badań jest określenie wpływu zróżnicowanej proporcji spalin w powietrzu dostarczonym do paleniska na ilość pozostających w spalinach związków CO i NO<sub>x</sub> podczas spalania biomasy. Na podstawie uzyskanych wyników uwzględniających współczynnik nadmiaru powietrza, udziału spalin w recyrkulacji oraz efektów wyrażonych ilością CO i NO<sub>x</sub> w spalinach będzie można określić optymalne warunki procesu spalania zmierzające do minimalnej zawartości szkodliwych substancji.

## Przedmiot i metodyka badań

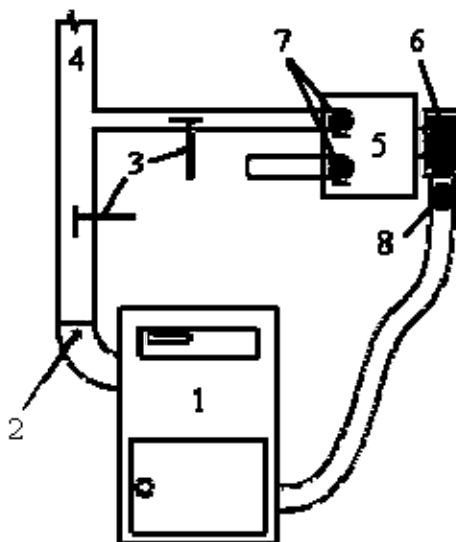
Urządzeniem w którym następowało spalanie przyjętego do badań nośnika energetycznego, był wysokotemperaturowy kocioł dostosowany do spalania pelet Verner A25 o mocy 25 kW produkcji czeskiej, firmy Verner a.s. Kocioł jest dostosowany do spalania pelet z drewna oraz ziarna zbóż. Paliwo jest zgromadzone w zabudowanym zasobniku i podawane do paleniska przy pomocy ślimakowego podajnika. Pelety są podawane do paleniska przez otwór w górnej części tylnej ściany spadając na płaski ruszt wykonany z sześciu ruchomych żeber rusztowych, na których odbywa się spalanie. Ruchomy ruszt pozwala na cykliczne wygarnianie stałych części pozostających z procesu spalania oraz rozluźnienie spalanej warstwy. Wentylator nadmuchu powietrza umieszczony jest obok paleniska, a strumień powietrza kierowany jest poprzez okrągłe otwory umieszczone po obu stronach komory spalania (rys. 1.)

Dla potrzeb badań standardową wersję kotła wyposażono w zewnętrzne urządzenie umożliwiające recyrkulację spalin. Urządzenie to składało się z komory recyrkulacyjnej połączonej rurą z kanałem spalinowym i kanału dostępu czystego powietrza. Na wyjściu z komory recyrkulacji umieszczono wentylator połączony przy pomocy rury elastycznej z kanałem dostarczającym czyste powietrze do kotła (rys. 2).



Źródło: materiały reklamowe

Rys 1. Kocioł VERNERA A25  
Fig. 1. A25 VERNER boiler



Rys. 2. Schemat układu połączeń recyrkulacji powietrza w kotle: 1 – kocioł, 2 – pomiar spalin, 3 – rurka Prandtla, 4 – wyciąg spalin, 5 – komora recyrkulacji, 6 – wentylator, 7 – przepustnice na wejściu do komory, 8 – przepustnica główna. *(projekt własny)*

Fig. 2. Diagram of boiler air recirculation system: 1 – boiler, 2 – measurement of exhaust gas, 3 – Prandtl pipe, 4 – gas exhaust system, 5 – recirculation chamber, 6 – fan, 7 – dampers at the inlet to chamber, 8 – main damper *(author's project)*

Stosunek spalin do powietrza czystego ustalany był za pomocą dwóch niezależnych przepustnic umieszczonych na wejściu do komory recyrkulacyjnej. Przepustnica główna umieszczona na wyjściu komory recyrkulacyjnej służy do ustalania ilości mieszanki podawanej do kotła.

## Metodyka pomiarów

Celem opracowania jest przedstawienie zależności zawartości tlenku węgla (CO), tlenków azotu (NO<sub>x</sub>) w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  dla wybranych proporcji mieszanki powietrze-spaliny  $r$ . Udział spalin w mieszaninie z powietrzem zwanej dalej liczbą proporcji  $r$  obliczono z następującego równania:

$$r = \frac{m_{ret}}{m_{tot} - m_{ret}} \quad [-]$$

gdzie:

- $m_{ret}$  – strumień spalin kierowany powtórnie do spalania [m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>],
- $m_{tot}$  – całkowity strumień spalin odprowadzany z kotła [m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>].

Wielkość strumienia spalin mierzono za pomocą rurki Prandtla podłączonej do różnicowego czujnika ciśnienia TESTO 350XL. Podczas badań przyjęto współczynnik recyrkulacji  $r = 0; 0,2$  i  $0,3$ .

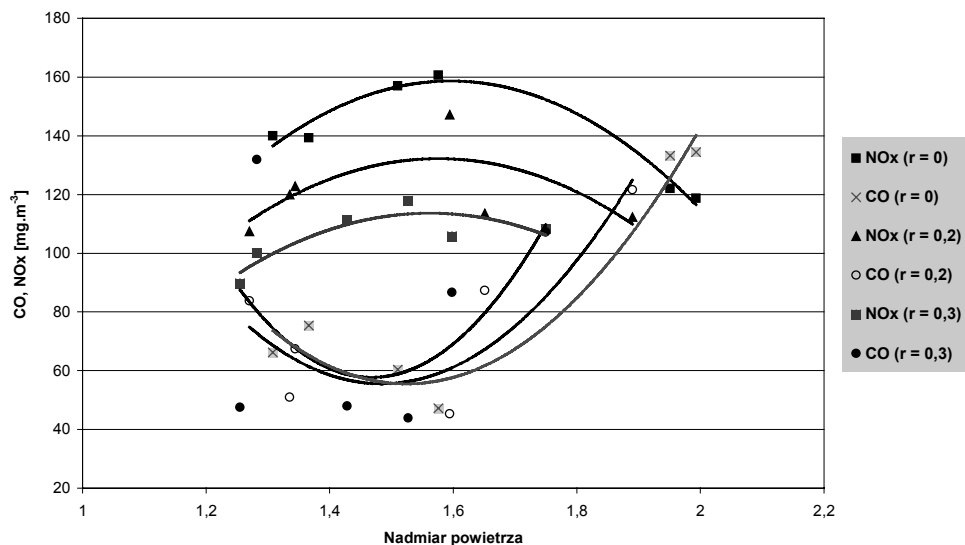
Dla każdego współczynnika recyrkulacji, po osiągnięciu równomiernego spalania, prowadzono jednogodzinny cykl pomiarowy. Tę metodę stosowano dla wszystkich założonych wartości nadwyżki powietrza w spalinach oraz we wszystkich powtórzeniach. W założonych badaniach przyjęto następujące wartości współczynnika nadwyżki powietrza  $\lambda = 1,3; 1,6$  i  $1,9$ , wówczas zawartość tlenu w spalinach wynosiła od 4 do 11%. Tym sposobem uzyskano 3 punkty dla obydwu obserwowanych wielkości szkodliwych związków ( $\text{CO}$  i  $\text{NO}_x$ ) oraz dla każdego założonego współczynnika recyrkulacji, a więc i trzy krzywe obrazujące przebieg zmian zawartości  $\text{CO}$  oraz 3 krzywe charakteryzujące zmiany zawartości  $\text{NO}_x$ . Badania przeprowadzono dla dwóch podobnych prób paliwa po 10 powtórzeń w każdym. Dla sporządzenia wykresu posłużono się wartościami średnimi każdej z prób. Zawartość poszczególnych szkodliwych związków w spalinach określano przy pomocy analizatora spalin TESTO 350XL.

### **Rodzaj badanych paliw**

Jako paliwo testowe przyjęto pelety z drewna o średnicy 8 mm oraz ziarno żyta. Atestację stanowiska pomiarowego rozpoczęto spalając pelety z drewna, które jak wykazały wcześniejsze badania cechują się małą zawartością szkodliwych związków podczas spalania. Drugą zaletą podczas spalania drewna jest w miarę stabilne spalanie oraz możliwość łatwej jego regulacji. Zmiany w konstrukcji kotła bądź też regulacja procesu spalania w badanym typie kotła były łatwe do wykonania i przedstawiono je na załączonej dokumentacji. Zasadniczym paliwem przyjętym do badań było żyto ozime, a dokładnie poślad pochodzący z procesu czyszczenia. Przy spalaniu tego rodzaju paliwa celem było sprawdzenie i ustalenie wpływu jak też proporcji recyrkulacji spalin na zawartość szkodliwych związków powstających w procesie spalania. Uzyskane wyniki porównano z wielkościami uzyskanymi podczas spalania drewna. Spalane ziarno żyta nie było poddawane żadnej obróbce.

### **Wyniki i ich analiza**

Uzyskane wyniki zostały przedstawione dla każdego z badanych paliw zgodnie z założoną metodyką w postaci wykresów na rysunkach 3 i 4. Przebieg dynamiki zmian świadczy o poprawnie przyjętych warunkach badań. Analizując przebieg krzywych na rysunkach 3 i 4 zauważamy, że zmiany zawartości  $\text{CO}$  są lustrzanym odbiciem stężenia  $\text{NO}_x$ . To jest szczególnie widoczne podczas spalania pelety drewna. Maksimum zawartości tlenków azotu uwidacznia się przy nieco większym nadmiarze powietrza niż przy  $\text{CO}$ .



Źródło: badania własne

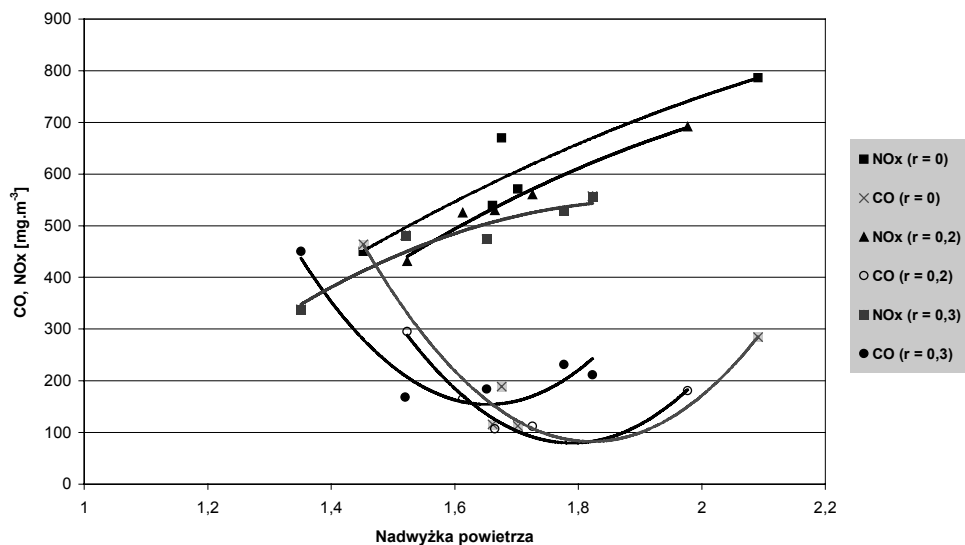
Rys. 3. Pelety z drewna – zmiany zawartości CO i NO<sub>x</sub> w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza przy poszczególnych wartościach recyrkulacji spalin

Fig. 3. Wood pellets – changes of CO and NO<sub>x</sub> depending on the air ratio for various values of exhaust gas recirculation

W procesie spalania ziarna żyta w przyjętym zakresie recyrkulacji spalin nie określono maksymalnej zawartości NO<sub>x</sub> co widoczne jest na rys. 4. Ilość wydzielanych tlenków azotu ma charakter rosnący, przy czym wraz ze wzrostem recyrkulacji spalin ich udział maleje. Śledząc przebieg krzywych na wykresie (rys. 4) zauważa się, że najkorzystniejszy skład spalin występuje przy recyrkulacji spalin na poziomie  $r=0,3$ . Porównując spalanie ziarna żyta w procesie bezpośrednim (bez recyrkulacji  $r=0$ ) ilość toksycznych związków azotu jest od 50 do 100  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  większa. Uzyskane wyniki przedstawione na rysunku 4 wyraźnie wskazują, że wpływ nadmiaru powietrza dostarczanego do procesu spalania na ilość emitowanych NO<sub>x</sub> jest znaczna i tak w przypadku braku recyrkulacji ( $r=0$ ) minimalna zawartość NO<sub>x</sub> przy nadmiarze powietrza wynoszącym  $\lambda=1,45$  sięgała 450  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , zaś zwiększając nadmiar powietrza do  $\lambda=2$  ilość NO<sub>x</sub> wzrosła do 790  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Przy recyrkulacji spalin wynoszącej  $r=0,2$  nie zauważa się istotnych zmian do wyżej opisanych, co widoczne jest na rys. 4. Przy zastosowaniu najwyższej przyjętej do badań recyrkulacji spalin  $r=0,3$  wpływ  $\lambda$  na tworzenie się NO<sub>x</sub> jest mniejszy.

Jeżeli chodzi o tlenek węgla, to na jego ilość w spalinach ma decydujący wpływ nadmiar powietrza. Minimalne jego wartości występują przy recyrkulacji  $r=0$  i  $r=0,2$  - mają podobne wartości i wynoszą średnio 100  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , dla stosunku nadmiaru powietrza wynoszącym  $\lambda=1,7\div 1,8$ . Przy recyrkulacji  $r=0,3$  uzyskano najniższą zawartość CO przy  $\lambda=1,5\div 1,6$ . Wyniosła ona około 170  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ .



Źródło: badania własne

Rys. 4. Ziarno żyta – zmiany zawartości CO i NO<sub>x</sub> w zależności od stosunku nadmiaru powietrza przy poszczególnych wartościach recyrkulacji spalin

Fig. 4. Rye grain – changes of CO and NO<sub>x</sub> depending on the air ratio for various values of exhaust gas recirculation

Optymalne warunki spalania ze względu na minimalną zawartość emitowanych związków podczas spalania ziarna żyta uzyskano przy recyrkulacji  $r=0,3$  oraz nadmiarze powietrza  $\lambda=1,5$ . Dalsze obniżanie nadmiaru powietrza prowadzi do szybkiego ograniczenia emisji związków azotu, ale za ceną szybkiego wzrostu CO.

Stosując recyrkulację spalin podczas spalania pelet z drewna zauważa się, że największe stężenie tlenków azotu występuje przy  $r=0$ . Maksymalna zawartość NO<sub>x</sub>, sięgająca  $160 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , występuje przy nadmiarze powietrza  $\lambda=1,5\div 1,6$ . Zwiększając udział spalin w dostarczonym do spalania powietrzu uzyskujemy w spalinach niższą zawartość tlenków azotu. W przyjętej w badaniach metodyce, gdzie  $r=0,3$ , uzyskano zmniejszenie zawartości NO<sub>x</sub> do poziomu  $120 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , przy niewiele mniejszej nadwyżce podawanego powietrza. Analizując uzyskane wyniki badań zauważa się, że stosując recyrkulację spalin uzyskujemy tylko niewielkie obniżenie zawartości tlenków azotu, a dynamika zmian przy zwiększaniu recyrkulacji ma charakter malejący. Śledząc uzyskane wyniki można powiedzieć, że decydujący wpływ na zawartość tlenków azotu ma sam rodzaj paliwa a dopiero drugorzędym czynnikiem jest udział recyrkulacji spalin.

## Podsumowanie

Na podstawie uzyskanych wyników badań można jednoznacznie stwierdzić, że recyrkulacja spalin przyczynia się do obniżenia zawartości  $\text{NO}_x$  w małych kotłach służących do spalania biomasy. Podczas spalania obu badanych paliw najkorzystniejsze wyniki uzyskano przy najwyższej założonej recyrkulacji  $r=0,3$ , gdzie nadmiar dostarczanego powietrza wynosił odpowiednio:  $\lambda=1,3\div 1,4$  podczas spalania pelet z drewna oraz  $\lambda=1,5\div 1,6$  przy spalaniu ziarna żyta.

Graficzna interpretacja wyników pozwoliła na wizualne stwierdzenie, że istnieje możliwość doboru parametrów pracy kotła, gdzie zawartość tlenków azotu i węgla jest najkorzystniejsza. Stąd też wydaje się celowe dalsze kontynuowanie badań ukierunkowane na automatykę sterowania procesem spalania. Parametrem sterującym może być zawartość tlenu w odprowadzanych spalinach, zaś elementem wykonawczym położenie przepustnicy w komorze recyrkulacji. O ile uzyskane wyniki przy spalaniu pelet z drewna możemy uznać za zadawalające i na ich podstawie przystąpić do automatyzacji procesu, tak przy spalaniu ziarna żyta programowanie będzie trudniejsze i wydaje się celowa dalsza kontynuacja badań.

Prezentowany artykuł został opracowany w realizacji Narodowego Programu Badań Ministerstwa Rolnictwa QE 1206 „Wieloskładnikowe biopaliwa prasowane” w ramach grantu Wielodyscyplinarnej Agencji Badawczej Uniwersytetu Rolniczego w Pradze „Optymalizacja procesów spalania biomasy”.

## Bibliografia

- Grzybek A.** 2006. Zasoby krajowe biopaliw stałych i możliwości ich wykorzystania w aspekcie technicznym, organizacyjnym i ekologicznym. *Energetyka Z.* IX, s. 8-11.
- Pągowski Z.** 2003. Czy biopaliwa szkodzą? *Wieś Jutra*, nr 2. s. 24-36.
- Świgoń J.** 2002. Lokalne kotłownie na biomasę – techniki i technologie spalania drewna. *Czysta Energia*, nr 11. s. 21-24.

## EFFECT OF COMBUSTION GAS RECIRCULATION ON BIOMASS BURNING PROCESS

**Summary.** There is a problem of increased concentration of nitrogen oxides in exhaust systems in the process of biofuel originating from plants. Exhaust gas recirculation is used in order to reduce nitrogen oxide content in the industrial boilers. The purpose of research was to apply and observe the mentioned process in small power boilers during the process of biomass burning. A 25 kW water boiler burning 8 cm dia. wood pellets and rye grain was selected as the subject of research. The obtained results confirmed analogy mentioned above. Most beneficial results were obtained at recirculation  $r = 0.3$  using air ratio  $\lambda = 1.3 \div 1.4$  while burning wood pellets, while air ratio of  $\lambda = 1.5 \div 1.6$  was used for burning of grain.

**Key words:** biomass, burning, nitrogen oxide, exhaust gas recirculation

**Adres do korespondencji:**

Martin Polák; e-mail: karel@tf.czu.cz  
16-521 Praha 6 – Suchbátarův  
Česká Republika

Kazimierz Rutkowski; e-mail: rutkowski@tier.ar.krakow.pl  
Katedra Inżynierii Rolniczej i Informatyki  
Akademia Rolnicza w Krakowie  
ul. Balicka 116B  
30-149 Kraków