

Ryszard Marian JANKA<sup>1</sup>

## OCENA EKOLOGICZNO-ENERGETYCZNA WYBRANYCH TECHNOLOGII SPALANIA SŁOMY

### ECOLOGICAL-ENERGETIC ASSESSMENT OF SELECTED STRAW COMBUSTION TECHNOLOGIES

**Abstrakt:** Przedstawiono wyniki badań emisyjno-energetycznych dwóch kotłowni spalających słomę w postaci rozdrobnionej oraz balotów. Wykazano, iż oddziaływanie ekologiczne kotłowni zależy od postaci, w jakiej słoma poddawana jest procesowi spalania, oraz typu stosowanego kotła. Spalanie słomy w kotłach w postaci rozdrobnionej w porównaniu do spalania całych balotów powoduje powstawanie większej ilości pyłów o drobniejszych frakcjach.

**Słowa kluczowe:** słoma, spalanie słomy, biomasa, emisja

Jedną z metod obniżenia poziomu emisji zanieczyszczeń wprowadzanych do atmosfery jest wykorzystanie zasobów energii odnawialnej, w tym spalanie biomasy. Pod względem jakościowym podstawowy skład pierwiastkowy biomasy i węgla jest taki sam. W tabeli 1 zestawiono skład chemiczny i wartości opałowe słomy, a dla celów porównawczych także drewna i węgla. Słoma pomimo niższej wartości opałowej (wynoszącej śr. 14,5 MJ/kg) w porównaniu do węgla kamiennego (śr. 22,0 MJ/kg) stanowi znaczące źródło energetyczne. Energia cieplna uzyskana ze spalania ok. 1,5 Mg (tony) słomy jest równoważna 1 Mg (tonie) węgla kamiennego.

Biomasa w porównaniu do węgla zawiera około czterokrotnie więcej tlenu (średnio 44%, podczas gdy węgiel kamienny ok. 12%), mniej pierwiastka węgla, mniej siarki i azotu, ale też więcej wilgoci oraz części lotnych. Istotnym problemem z punktu widzenia ochrony środowiska i warunków eksploatacji kotłów jest to, iż niektóre jej rodzaje w porównaniu do węgla zawierają większą ilość chloru, np. słoma czy też niektóre gatunki drewna (tab. 1). Przy spalaniu słomy w porównaniu do węgla powstaje ponadto duża ilość smoły, a mniej popiołu (tab. 1).

Tabela 1

Porównanie składu i wartości opałowej biomasy<sup>1</sup> i węgla<sup>1</sup> wydobywanych w Polsce (opr. wg [1-3])

Table 1

Comparison of the composition and calorific value of coal and biomass mined in Poland ed. by [1-3])

Nazwa paliwa	Zawartość pierwiastka <sup>1</sup> [% mas.]				Zawartość wilgoci [%]	Wartość opałowa <sup>1</sup> [MJ/kg]	Zawartość części lotnych [% mas.]	Zawartość popiołu [% s.m.]
	C <sub>śr</sub>	N	S	Cl				
Słoma	48	0,28±0,8	0,05±0,16	0,15±0,8	12÷20	12,0÷17,3	70÷75	4÷6,0
Drewno	52,5	0,08±0,3	0,02±0,12	< 0,11	30÷55	6,0÷13,0	70÷85	0,2÷4,0
Węgiel kamienny	82	0,6±2,0	0,53±2,5	śr. 0,012 (max 0,2)	6÷13	18,3±25	35	20÷27

<sup>1</sup> - w stanie roboczym

<sup>1</sup> Zakład Sozotechniki i Sterowania Środowiskiem, Samodzielna Katedra Inżynierii Procesowej, Uniwersytet Opolski, ul. R. Dmowskiego 7-9, tel. 77 401 66 80, email: rjanka@uni.opole.pl

Podwyższona zawartość związków krzemu i potasu w spalanej słomie skutkuje m.in. powstawaniem popiołów mających mniejszą niż węgiel temperaturę mięknięcia oraz większą skłonność do tworzenia osadów na powierzchniach grzewczych kotłów. Przy spalaniu biomasy wydzielają się ponadto sylwit (KCl) i halit (NaCl), które, kondensując na rurach kotła, przyspieszają proces ich korozji [1, 2].

### Kotły stosowane do spalania słomy

Słoma w kotłach może być spalana w postaci: balotów, siewki lub granulatu (brykietów). Do spalania przemysłowego słomy stosowane są więc różnej konstrukcji kotły, których budowa po części wynika m.in. z postaci spalanej słomy, małej gęstości stosowanego paliwa ( $50\div 250\text{ kg/m}^3$ ), jej niejednorodności oraz dużej zawartości części lotnych (powyżej 80% mas.), a także tendencji do scalania (spiekania) się już w temperaturze  $700\div 1100^\circ\text{C}$ . Proces spalania słomy optymalnie przebiega w zakresie temperatur  $850\div 900^\circ\text{C}$  ( $1100^\circ\text{C}$ ) [2, 4].

Wyróżnia się cztery podstawowe typy kotłów, tj.:

- wsadowe (rys. 1) - w których cyklicznemu spalaniu podlegają całe baloty słomy;
- wsadowe - w których stosowana jest tzw. „technologia cygarowa” - spalanie słomy przebiega na czołowej płaszczyźnie włączanego balotu;
- rusztowe (rys. 2) - z rusztem ruchomym płaskim lub pochyłym (najczęściej schodkowym lub taśmowym), w których ciągłemu procesowi spalania podawana jest słoma rozdrobiona (tzw. siewka o długości ok.  $6\div 10\text{ cm}$ ) oraz
- rusztowe do spalania brykietów.



Rys. 1. Zdjęcie kotłów typ wsadowego

Fig. 1. Photo of a batch type boilers



Rys. 2. Zdjęcie ruchomego rusztu

Fig. 2. Photo movable stepped grate boiler

Standardowe kotły wsadowe zasilane są balotami prostopadłościennymi lub cylindrycznymi, przy czym w zależności od mocy kotła wsad ma masę od ok. 25 do 600 kg. Sprawność stosowanych obecnie kotłów kształtuje się na poziomie  $75\div 85\%$ . Najnowsze typy kotłów wsadowych w porównaniu do obecnie użytkowanych jednokomorowych wyposażone są w dwie komory - w pierwszej następuje zgazowanie słomy, a w drugiej spalanie wydzielanych ze słomy palnych lotnych składników gazowych.

### Badane instalacje spalające słomę

Ocenie emisyjno-energetycznej poddano dwie ciepłownie znajdujące się w dwóch blisko siebie położonych północnych rejonach kraju. Wyposażone są one w różnego typu kotły wodne niskotemperaturowe spalające słomę, w których maksymalna temperatura wody na wyjściu z kotła wynosi 95°C. W jednej ciepłowni zainstalowane były m.in. dwa kotły typu wsadowego o łącznej mocy 2 x 0,50 MW, w których spalano baloty, a w drugiej używano m.in. dwóch kotłów rusztowych o mocach 2 x 2,5 MW wyposażonych w ruchome ruszty schodkowe (rys. 1-3). W tabeli 2 zestawiono podstawowe parametry techniczne badanych kotłów oraz ilości ciepła wytwarzanego w sezonie grzewczym. Obie kotłownie (ciepłownie) wyposażone były w tego samego typu multicyklony.

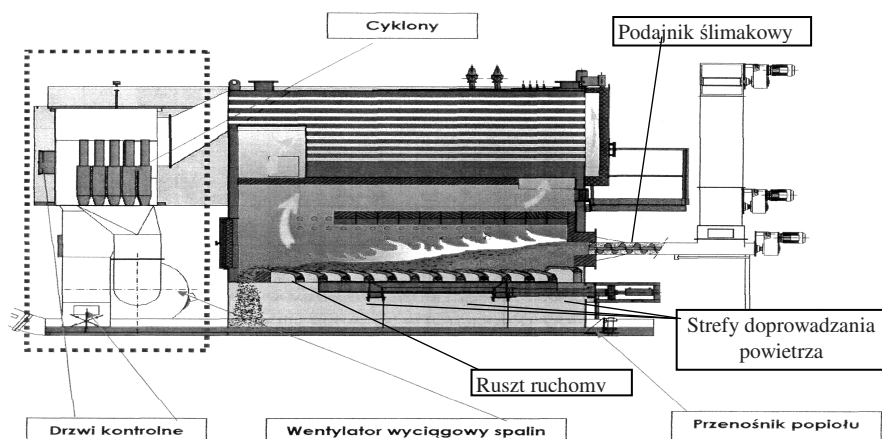
Parametry techniczne badanych kotłów

Tabela 2

Technical specifications of boilers tested

Table 2

Oznaczenie kotłowni	Typ kotła	Typ pieca	Postać i wymiary spalanej słomy	Moc kotłów [MW]	Sprawność kotła [%]	Współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda$
KW	wodny RM-03-2	wsadowy	baloty $\varnothing 1,5 \div 1,8$ m	2 x 0,50	80	1,25
KP	wodny	ruchomy ruszt schodkowy	rozdrobiona, dł. 6÷10 cm	2 x 2,5	85	



Rys. 3. Kocioł wodny z rusztem ruchomym typu Compact 250 DS (oprac. wg [3])

Fig. 3. Hot water boiler with moving grate Compact 250 DS (ed. by [3])

### Spalane paliwo i parametry pracy kotłów

W obu kotłowniach spalana była tego samego rzędu ilość różnego rodzaju słomy (pszenicznej, żytniej i z pszenżyta), tj. 1862 i 2046 Mg o zbliżonych wartościach opałowych, wilgotności i składzie chemicznym (tab. 3 i 4). W obu ciepłowniach wilgotność spalanej słomy kształtowała się poniżej wymaganych 22%, najczęściej w przedziale od 14

do 16% (tab. 4). Przy tym poziomie wilgoci wartość opałowa spalanych gatunków słomy kształtowała się na poziomie ok. 13÷14 kJ/kg. W kotłach wsadowych do każdego pieca załadowywano po jednym balocie o średnicy od 150÷180 cm i długości 120 cm, natomiast średnie zużycie słomy w kotłach rusztowych wynosiło ok. 437 kg/h. Proces spalania słomy był przeprowadzany w temperaturach 850÷900°C, przy tym samym nadmiarze powietrza wynoszącym 25%.

Tabela 3

Skład chemiczny spalanych gatunków słomy

Table 3

The chemical composition of straw combustion species

Wielkość Rodzaj słomy	Udział masowy składnika [kg/kg] C + H + O + N + S + Cl + P = 1 [kg / kg m.s.]						Części lotne [% m.s.]	Wartość opałowa [MJ/kg]
	C	H	O <sub>2</sub>	N	S·10 <sup>-3</sup>	Cl·10 <sup>-3</sup>		
żytnia	0,466	0,060	0,419	0,006	0,848	3,961	76,4	13÷14 śr. 13,5
pszeniczna	0,456	0,058	0,421	0,005	0,818	1,922	77,0	
pszenżyta	0,439	0,059	0,434	0,004	0,556	2,653	75,2	
jęczmienna	0,475	0,059	0,456	0,005	0,888	4,046	77,3	

### Aparatura pomiarowa i metoda pomiaru

Ocena emisyjności analizowanych kotłowni przeprowadzono na podstawie wyników pomiarów emisji zanieczyszczeń gazowych przeprowadzonych przez licencjonowane zakłady pomiarowe. Pomiary zanieczyszczeń gazowych: CO, SO<sub>2</sub> i NO<sub>2</sub> zostały wykonane metodami absorpcji promieniowania IR zgodnie z metodykami referencyjnymi określonymi w PN [5]. Z kolei pomiary stężenia i strumienia pyłu wykonano metodą gravimetryczną zgodnie z wymogami określonymi w PN [7] i rozporządzeniach MŚ [6].

### Wyniki badań i ich omówienie

Do oceny zarówno emisyjno-energetycznej technologii spalania badanej biomasy, jak i typu stosowanych kotłów zastosowano wskaźnik emisji  $w_{ei}$  zdefiniowany jako iloraz:

$$w_{ei} = \frac{\dot{E}_i}{Q_t} \quad (1)$$

gdzie:  $w_{ei}$  - wskaźnik emisyjno-energetyczny technologii spalania [kg/GJ],  $\dot{E}_i$  - emisja  $i$ -tego zanieczyszczenia w analizowanym okresie czasu [kg],  $Q_t$  - ilość ciepła wytworzonego w danym kotle w analizowanym okresie czasu [GJ].

Przeprowadzone badania wykazały, że przy stosowaniu różnej technologii spalania słomy, tj. w postaci balotów i siewki, a tym samym różnych typów kotłów uzyskuje się różne efekty emisyjne i energetyczne przy spalaniu tej samej ilości i rodzaju oraz charakterystyce fizykochemicznej biomasy (tab. 4-6). Dotyczy to podstawowych badanych zanieczyszczeń, tj. pyłu i tlenku węgla, co obrazują wartości wskaźnika emisyjno-energetycznego  $w_{ei}$  (tab. 5). Przy spalaniu słomy w postaci rozdrobnionej występuje wyższy poziom emisji pyłu o ok. 15% na jednostkę wytworzonego ciepła w porównaniu do przypadku, gdy spalana jest ona w postaci balotów w kotle wsadowym (tab. 5). Różnica ta

jest więc znaczna i wynosi ok. 0,4 kg na każdy 1 GJ wytworzonej energii. Podczas spalania słomy, co jest charakterystyczne, powstaje duża ilość pyłów o bardzo małych rozmiarach. Uwzględniając powyższe i wyniki przedstawionych powyżej badań oraz fakt, iż w obu badanych kotłowniach stosowane były identyczne odpylacze odśrodkowe (multicyklony), można więc przyjąć, iż podczas spalania słomy w kotle rusztowym powstaje większa ilość pyłów bardzo drobnych w porównaniu do składu pyłów wytwarzanych w kotle wsadowym.

Tabela 4

Poziom emisji zanieczyszczeń w ciągu roku

Table 4

The level of emissions during years

Oznaczenie kotłowni	Postać spalanej słomy	Wilgotność [%]	Typ kotła	Urządzenie odpylające	Emisja zanieczyszczeń		
					pył	NO <sub>2</sub>	CO
KW	baloty	14-16	wsadowy	multicyklon	5467	3600	17 101
KP	rozdrobiona		rusztowy schodkowy, ruchomy		7357	4264	18 622

Tabela 5

Wartości wskaźników emisji zanieczyszczeń z badanych kotłów

Table 5

Values of emissions from boilers tested

Oznaczenie kotłowni	Postać spalanej słomy	Moc kotłów [MW]	Ilość wytworzonego ciepła Q [GJ]	Wskaźnik emisja zanieczyszczeń		
				pył	NO <sub>2</sub>	CO
KW	baloty	2 x 0,5	20 108	0,272	0,179	0,850
KP	rozdrobiona	2 x 2,5	23 473	0,313	0,182	0,793

Tabela 6

Ilości i koszty wytwarzanego ciepła w badanych ciepłowniach

Table 6

Quantity and cost of heat produced in heating plants surveyed

Oznaczenie kotłowni	Postać spalanej słomy	Ilość spalonego paliwa [Mg]	Ilość wytworzonego ciepła [GJ]	Moc całkowita kotłów [MW]	Ilość ciepła wytwarzanego z jednostki paliwa [GJ/Mg]
KW	baloty	1861,9	20 108	2 x 0,50	10,80
KP	rozdrobiona	2045,6	23 473	2 x 2,5	11,47

Zmiany wartości wskaźnika emisji  $w_{ei}$  tlenku węgla (tab. 5), obliczone dla obu różnych technologii spalania słomy przy tym samym nadmiarze powietrza (tab. 2) i przy niezminiającej się wartości tego wskaźnika w odniesieniu do ditlenku azotu, sugerują, iż procesy spalania słomy zachodziły przy tych samych średnich temperaturach gazów, lecz zmiennych, różnych rozkładach temperatur gazów w przestrzeni komór kotłów.

W ciepłowni wyposażonej w kotły rusztowe podczas spalania słomy w postaci rozdrobnionej uzyskiwano znacznie większą efektywność wytwarzania energii z tej samej

ilości paliwa aniżeli w kotłach wsadowych spalających słomę w postaci balotów (tab. 6). Wynikało to m.in. z wyższej sprawności energetycznej kotłów rusztowych w porównaniu do kotłów wsadowych, ich niejednakowego obciążenia cieplnego oraz różnych konstrukcji i mocy cieplnych (0,50 i 2,5 MW).

### Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że spalanie słomy w postaci rozdrobnionej w kotłach rusztowych schodkowych powoduje wzrost ilości wytwarzanych pyłów bardzo drobnych w stosunku do składu ziarnowego pyłów powstających przy spalaniu słomy w postaci balotów w kotłach wsadowych. Uwzględniając powyższe, do odpylania spalin emitowanych z kotłów rusztowych spalających słomę w postaci rozdrobnionej należy stosować odpowiedniej klasy odpylacze, np. filtry workowe, bardziej odpowiednie do wydzielania z gazu pyłów o rozmiarach mikronowych aniżeli odpylacze odśrodkowe. Niezależnie od powyższego, konieczne jest także przeprowadzenie korekty zalecanych wartości wskaźników unosu/emisji pyłów stosowanych przy obliczaniu poziomu emisji pyłów z kotłów rusztowych. Wymaga to jednak dalszych badań.

### Literatura

- [1] Janka RM. Wpływ współspalania węgla biomasą na poziom emisji zanieczyszczeń, stabilność pracy kotła i instalacji oczyszczającej gazy odlotowe. *Ochr Powietrza i Probl Odpadów*. 2007;3-4:93-99.
- [2] Rybak W. Spalanie i współspalanie biopaliw stałych. Wrocław: Wyd Polit Wrocław; 2006.
- [3] Materiały informacyjno-techniczne badanych ciepłowni.
- [4] Wandrasz WJ, Wandrasz AJ. Paliwa formowane. Warszawa: Wyd Seidel-Przywecki; 2006.
- [5] PN-ISO-10396:2001. Emisja ze źródeł stacjonarnych. Pobieranie próbek do automatycznego pomiaru stężenia składników gazowych.
- [6] Rozporządzenie MŚ w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji. DzU 04.283.2842. Zał. Nr 2.
- [7] PN-Z-04030-7:1994. Pomiary stężenia i strumienia masy pyłu w gazach odlotowych metodą grawimetryczną - metoda referencyjna.

## ECOLOGICAL-ENERGETIC ASSESSMENT OF SELECTED STRAW COMBUSTION TECHNOLOGIES

An Independent Department of Process Engineering, Opole University

**Abstract:** The results of emission-energy two straw burning boiler in particulate form and the bale were presented. It was shown that the ecological impact depends on the boiler as it undergoes a process of straw burning and the type of boiler used. Straw combustion in boilers in particulate form compared with the combustion of whole bales causing more dust to finer fractions.

**Keywords:** straw, consuming straw, biomass, emission