

Ryszard Marian JANKA¹

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 biomas¹ i węgla¹ wydobywanych w Polsce (opr. wg [1-3])

Table 1

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

Nazwa paliwa	Zawartość pierwiastka ¹ [% mas.]				Zawartość wilgoci [%]	Wartość opałowa ¹ [MJ/kg]	Zawartość części lotnych [% mas.]	Zawartość popiołu [% s.m.]
	C _{sr}	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

¹ - w stanie roboczym

¹ 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, siewczki 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°C) [2, 4].

Wyróżnia się cztery podstawowe typy kotłów, tj.:

- wsadowe (rys. 1) - w których cyklicznie 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 rozdrobniona (tzw. siewczka 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.

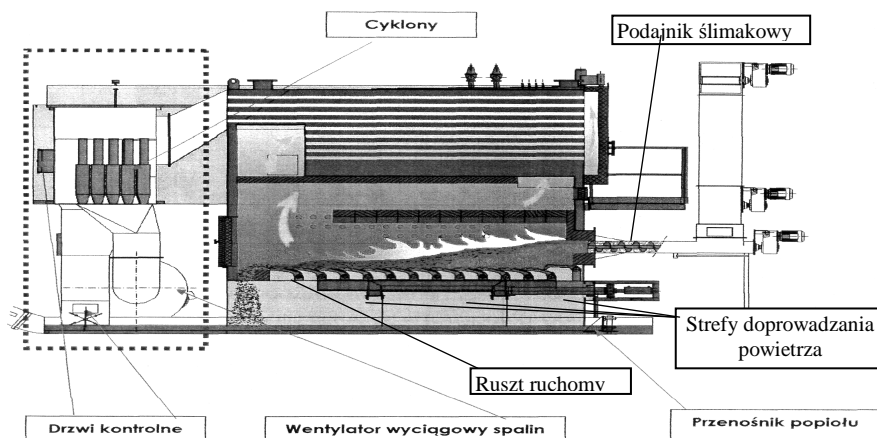
Parametry techniczne badanych kotłów

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 λ
KW	wodny RM-03-2	wsadowy	baloty \varnothing 1,5÷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 opałowia 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 opałowia [MJ/kg]
	C	H	O ₂	N	S·10 ⁻³	Cl·10 ⁻³		
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

Ocenę emisyjności analizowanych kotłowni przeprowadzono na podstawie wyników pomiarów emisji zanieczyszczeń gazowych przeprowadzonych przez licencjonowane zakłady pomiarowe. Pomiar zanieczyszczeń gazowych: CO, SO₂ i NO₂ zostały wykonane metodami absorpcji promieniowania IR zgodnie z metodykami referencyjnymi określonymi w PN [5]. Z kolei pomiary stężenia i strumienia pyłu wykonano metodą grawimetryczną 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 ₂	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 ₂	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 niezmiennącej 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 rozdrobionej 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