

Badanie emisji zanieczyszczeń gazowych podczas spalania paliw biomasowych lub przetworzonych biopaliw

Wstęp

W ostatnich latach, w związku ze zmianami klimatu, których przyczyn upatruje się w działalności człowieka, duży nacisk kładziony jest na odnawialne i alternatywne źródła energii. Ich zastosowanie ma ograniczyć emisję gazów cieplarnianych, których głównym reprezentantem jest ditlenek węgla - CO₂. Do źródeł takich można zaliczyć biomasę. Jej **zeroemisyjność** wynika z cyrkulacji ditlenku węgla w przyrodzie. Innymi słowy, w trakcie spalania biomasy do atmosfery wprowadza się tyle CO₂ ile wcześniej zostało pochłonięte przez roślinę w trakcie jej wzrostu.

Zgodnie z Rozporządzeniem Unijnym nr 651/2014 za biomasę uznaje się ulegającą biodegradacji frakcję produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej (w tym substancje pochodzenia roślinnego i zwierzęcego), leśnej i powiązanych gałęzi przemysłu, w tym rybołówstwa i akwakultury, a także biogazy i ulegającą biodegradacji frakcję odpadów przemysłowych i komunalnych. W praktyce największe zastosowanie znalazły odpady roślinne takie drewno, słomy i trawy oraz skorupy i łuski.

Biomasa powstaje w procesie fotosyntezy zgodnie z równaniem:



gdzie CH₂O jest ogólnym wzorem węglowodanów. Biomasa roślinna składa się z trzech podstawowych składników: **celulozy (45-55%)**, **hemicelulozy (12-22%)** oraz **ligniny (20-30%)**. Wszystkie one są naturalnymi polimerami, z czego dwa pierwsze należą do polisacharydów (cukrów). Poza tymi głównymi składnikami biomasę roślinną tworzą również pektyny, tłuszcze i woski.

Ze względu na swój skład, biomasę charakteryzuje inny skład pierwiastkowy niż typowe paliwa kopalne. Zawartość węgla w biomasie jest znacząco mniejsza (około 50 %), co spowodowane jest dużym udziałem tlenu (około 40-50 %). Zawartość wodoru w węglu i biomasie jest zbliżona i wynosi około 6 %. Taki skład skutkuje niższą wartością opałową biomasy, gdy porównamy ją do węgla czy ropy. Dodatkowo, na jej kaloryczność wpływa również negatywnie duża zawartość wilgoci. Inny niż w przypadku paliw kopalnych jest również udział substancji mineralnej. Generalnie zawartość substancji mineralnej, a tym samym zawartość popiołu w biomasie, jest mniejsza niż w węglu. Różnie natomiast wygląda udział poszczególnych składników. O ile zawartość tlenków glinu i żelaza (Al₂O₃ i Fe₂O₃) jest nawet kilkunastokrotnie mniejsza, o tyle udział fosforu i metali alkalicznych (MgO, K₂O) może być nawet kilkunastokrotnie większy (szczególnie w słomie). Dodatkowo, biomasa często charakteryzuje się dużą zawartością chloru. Kolejną charakterystyczną cechą biomasy jest bardzo niska zawartość siarki. Najwyższa zawartość siarki cechuje słomę i wynosi ona maksymalnie 0,5 % (w przeliczeniu na suszą masę). Dla porównania, zawartość siarki w węglu wynosi przeciętnie od 1 do 5 %.

Spalanie biomasy przebiega w czterech etapach (Rys. 1) charakterystycznych również dla węgla:

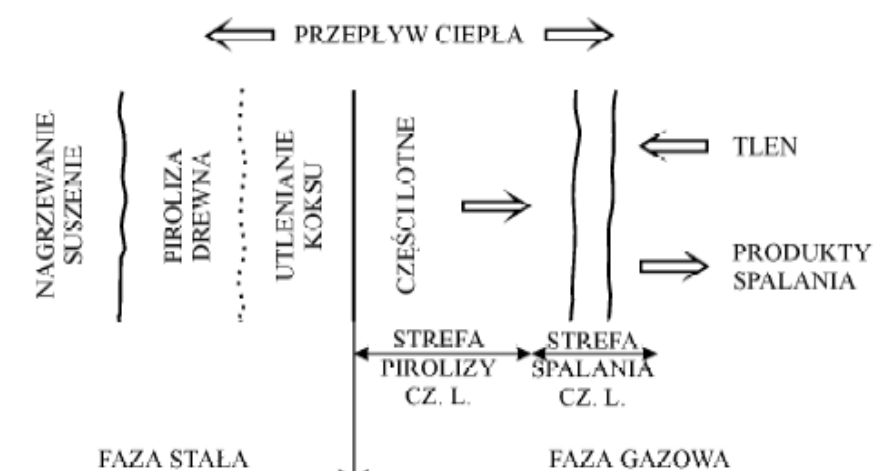
- nagrzewanie i suszenie,
- rozkład termiczny,
- spalanie produktów rozkładu termicznego,

„BIOMASA W ENERGETYCE” LABORATORIUM

- spalanie pozostałości koksowej.

Różni się ono jednak od spalania węgla (szczególnie kamiennego) ze względu na wymienione wyżej właściwości biomasy. Duża zawartość wody opóźnia zapłon i wydłuża czas suszenia. Rozkład termiczny (odgazowanie) powoduje bardzo duży ubytek masy próbki (dla drewna średnio 60-70 %). Niewielka pozostałość koksu spala się znacznie szybciej niż otrzymana przy spalaniu węgla kamiennego. Spalanie tego typu, gdzie dominującym procesem jest odgazowanie i spalanie jego produktów, jest charakterystyczne dla paliw od dużej zawartości części lotnych, np. młodych węgli takich jak węgiel brunatny. Części lotne otrzymywane są w wyniku rozkładu termicznego hemicelulozy, celulozy i ligniny. Składniki te ulegają rozkładowi w różnym zakresie temperatur:

- hemiceluloza 220÷320 °C,
- celuloza 320÷370 °C,
- lignina 320÷500 °C.



Rysunek 1. Etapy spalania biomasy.

Poza wymienionymi różnicami w procesie spalania, użytkowanie biomasy jako paliwa nastrocza dodatkowych problemów:

- ze względu na swoją włóknistą strukturę biomasa nie nadaje się do mielenia w młynach kulowych. Jej rozdrobnienie jest znacznie bardziej energochłonne niż ma to miejsce w przypadku węgla,
- niska gęstość nasypowa powoduje, że transport biomasy jest kosztowny,
- duża zawartość chloru oraz metali alkalicznych powoduje szlakowanie kotła, korozję i defluidyzację złoża (w paleniskach fluidalnych).

Paleniska na biomase powinny uwzględniać specyfikę jej spalania: dłuższą fazę suszenia, dłuższy płomień (wynikający ze spalania części lotnych) czy niższą temperaturę mięknięcia popiołu. Z względu na organizację procesu spalania wyróżnia się cztery podstawowe typy palenisk stosowanych również przy spalaniu węgla:

- Paleniska rusztowe (warstwowe)
- Fluidalne
- Retortowe
- Cyklonowe

Dość powszechnym, zwłaszcza w Polsce, procesem wykorzystania biomasy na dużą skalę jest współspalanie z węglem, które może odbywać się również w kotłach pyłowych.

Ze względu na swoje niekorzystne właściwości, biomase na cele energetyczne poddaje się wstępnej obróbce. Do podstawowych procesów obróbki należy **suszenie, rozdrabnianie i zagęszczanie**. Do

„BIOMASA W ENERGETYCE” LABORATORIUM

tego ostatniego zalicza się peletyzację czy brykietowanie. W ich wyniku, poprzez zastosowanie pras mechanicznych (peleciarek i brykieciarek) i często dodatku lepiszcza, otrzymuje się bardziej zwarty, łatwiejszy w transporcie i operowaniu produkt. Innym, bardziej zaawansowanym procesem mającym na celu uszlachetnienie biomasy jako paliwa jest **toryfikacja**. Proces ten polega na termicznym traktowaniu biomasy bez dostępu powietrza w średnim zakresie temperatur (250 ± 300 °C). W efekcie toryfikacji otrzymujemy produkt o dużo większej przemiałości i często większej wartości opałowej.

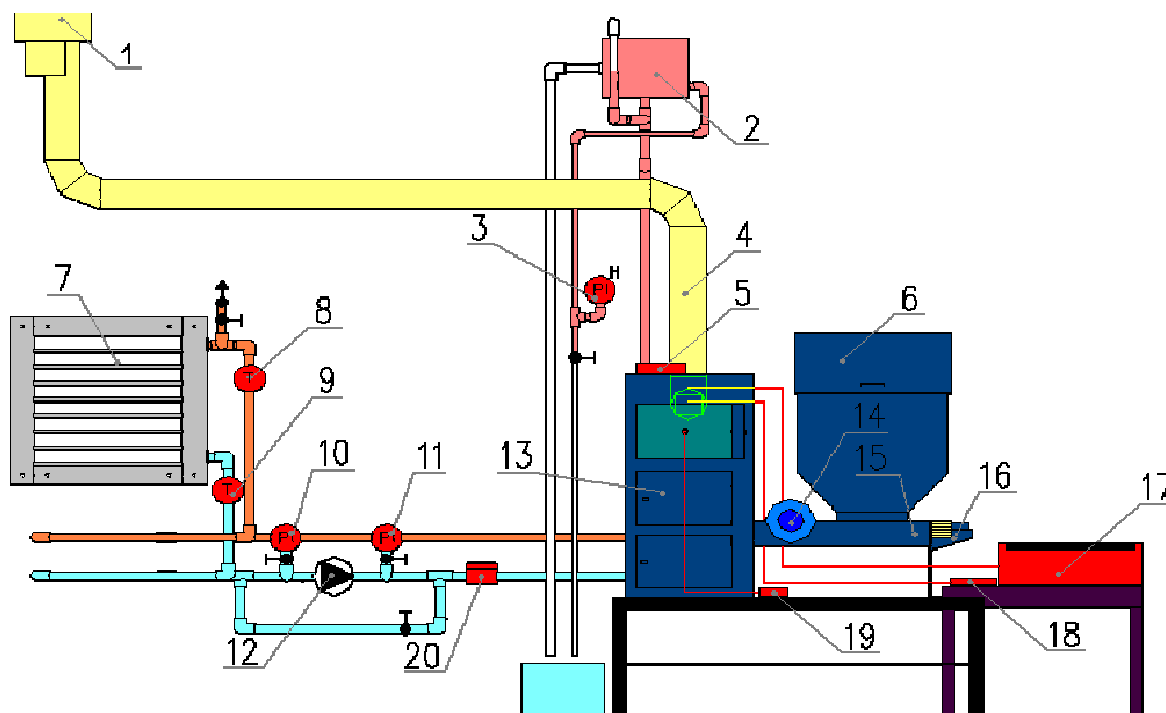
Mówiąc o biomase warto zaznaczyć, że jej zastosowanie w procesach energetycznych nie ogranicza się tylko do spalania. Biomas znajduje również zastosowanie w następujących procesach:

- zgazowania i pirolizy,
- fermentacji,
- konwersji do paliw ciekłych: olejów, alkoholi, estrów.

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową i działaniem kotła małej mocy na paliwo biomasowe (pelety), wykonanie bilansu energetycznego układu grzewczego oraz pomiar emisji zanieczyszczeń podczas spalania biomasy.

2. Schemat stanowiska



Uwaga! Schematów z instrukcji nie wolno kopiować do sprawozdań!

- 1) komin; 2) naczynie wzbiorcze; 3) manometr; 4) przewód spalinowy;
- 5) panel sterownika kotła; 6) zasobnik paliwa; 7) wodna nagrzewnica powietrza;
- 8), 9) termometr membranowy; 10), 11) manometry, 12) pompa obiegowa;
- 13) kocioł wodny; 14) wentylator powietrza; 15) podajnik ślimakowy; 16) silnik krokowy;
- 17) analizator spalin; 18) miernik temperatury spalin; 20) ciepłomierz

3. Opis kotła KP-15 wchodzącego w skład stanowiska badawczego

Zespół kotłowy składa się z pięciu zasadniczych elementów:

- kotła (stalowy korpus, troje drzwiczek - środkowe z wziernikiem do podglądu płomienia, czopuch, płaszcz zewnętrzny, wyczystka górna),
- zespołu palnika (palenisko retortowe, wentylator podmuchu, regulator wentylatora),
- zespołu podajnika (podajnik ślimakowy, zasobnik paliwa),
- zespołu napędowego (silnik elektryczny),
- sterownika elektronicznego.

Kocioł wyposażony jest w elektroniczny sterownik, umożliwiający programowanie trybów pracy poszczególnych podzespołów (wentylator, silnik zespołu podajnika). Dzięki temu możliwe jest takie dobranie parametrów, aby urządzenie pracowało z maksymalną sprawnością przy jednoczesnym ograniczeniu emisji substancji szkodliwych. Paliwo podawane jest automatycznie do retorty przy pomocy podajnika ślimakowego. Jego doprowadzenie następuje od dołu paleniska do warstwy żaru. Powietrze podawane jest w dolnej części retorty, w pobliżu warstwy żaru, za pomocą wentylatora podmuchu. Kocioł został dodatkowo wyposażony w regulator obrotów wentylatora podającego powietrze do spalania. Dzięki niemu możliwe jest badanie emisji podczas spalania danego paliwa przy stałym nadmiarze powietrza.

Dzięki wyposażeniu zasobnika kotła w silnik krokowy napędzający ślimak, możliwe jest dostarczanie paliwa w sposób okresowy - do spalania trafia określona porcja paliwa niezbędna do uzyskania temperatury zadanej przez użytkownika na sterowniku elektronicznym. Pozwala to na wydłużenie czasu, w którym urządzenie może pracować bezobsługowo.

4. Przebieg ćwiczenia

W trakcie trwania ćwiczenia bada się emisję substancji szkodliwych podczas spalania różnego rodzaju biomas, uformowanych do postaci peletów oraz procentowy udział tlenu O_2 w spalinach, z którego wyznaczyć można nadmiar powietrza. Mierzone są też parametry instalacji ciepłowniczej, które pozwalają wyznaczyć sprawność całej instalacji.

Badanie obejmuje następujące pomiary:

- temperatura wody gorącej – zasilającej instalację, mierzona za pomocą termometru membranowego zamontowanego na wejściu do nagrzewnicy powietrza (8);
- temperatura wody na powrocie do kotła, mierzona za pomocą termometru membranowego zamontowanego na wyjściu z nagrzewnicy powietrza (9),
- temperatura płomienia,
- temperatura spalin na wylocie, mierzona za pomocą miernika i termopary typu K (18),
- strumień objętości czynnika obiegowego (wody), odczytywany z ciepłomierza ultradźwiękowego (20),
- zużycie paliwa, którego miarą jest ubytek objętości paliwa z zasobnika w czasie,
- skład spalin (O_2 , CO , NO), mierzony np. analizatorem spalin GASMET DX-4000 (17) połączonym z króćcem pomiarowym zamontowanym w górnych drzwiczkach kotła poprzez sondę i wąż grzany.

„BIOMASA W ENERGETYCE” LABORATORIUM

5. Sposób opracowania wyników

5.1 Wyznaczanie sprawności kotła metodą bezpośrednią:

$$\eta_b = \frac{m_w \cdot C_w \cdot (t_{w2} - t_{w1})}{B_b \cdot Q_w} \cdot 100$$

gdzie: η_b – **sprawność kotła (procent)**,

m_w – średni strumień masy wody w instalacji ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$),

C_w – ciepło właściwe wody ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{deg}^{-1}$),

t_{w1} – średnia temperatura wody na powrocie do kotła (deg),

t_{w2} – średnia temperatura wody na zasilaniu instalacji (deg),

Q_w – wartość opałowa paliwa ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$),

B_b – strumień masy paliwa ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$).

$$B_b = m / \Delta\tau$$

gdzie: m – masa zużytego paliwa,

$\Delta\tau$ – czas pomiaru zużycia paliwa.

5.2. Wyznaczenie współczynnika nadmiaru powietrza λ :

$$\lambda = \frac{21}{21 - O_2}$$

gdzie: λ – **współczynnik nadmiaru powietrza**,

21% – zawartość tlenu w powietrzu,

O_2 – zawartość tlenu w spalinach (procent).

5.3. Przeliczenie poziomu zanieczyszczeń na odniesiony do stałej zawartości tlenu 10%:

$$CO^{10\%} = CO^{zm} \cdot \frac{21\% - 10\%}{21\% - O_2},$$

$$NO^{10\%} = NO^{zm} \cdot \frac{21\% - 10\%}{21\% - O_2},$$

gdzie: $CO^{10\%}$ – **przeliczona zawartość CO w spalinach (ppm)**,

$NO^{10\%}$ – **przeliczona zawartość NO w spalinach (ppm)**,

CO – zmierzona zawartość CO w spalinach (ppm),

NO – zmierzona zawartość NO w spalinach (ppm),

21% – zawartość tlenu w powietrzu,

10% – referencyjna zawartość tlenu w spalinach,

O_2 – zawartość tlenu w spalinach (procent).

5.4. Wykonanie wykresów

W sprawozdaniu należy wykonać wykresy zależności emisji zanieczyszczeń przeliczonych na 10% udziału tlenu w spalinach ($CO^{10\%}$ oraz $NO^{10\%}$) oraz temperatury płomienia i spalin (t_p i t_s) w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza (λ).

„BIOMASA W ENERGETYCE” LABORATORIUM

6. Zestawienie mierzonych wartości

numer pomiaru	strumień obj. wody q_v	temperatura				skład spalin		
		wody		płomienia t_p	spalin t_s	O ₂	CO	NO
		zasilanie t_{w1}	powrót t_{w2}					
-	m ³ /h	°C				%	ppm	ppm
1								
2								
3								
...								

7. Wiadomości uzupełniające

Literatura: „Spalanie i paliwa” *	
wyd. V, W-w (2008)	wyd. IV, W-w (2005)
181-187, 190-199, 446-456, 469-474	171-192, 433-443

* - Podręcznik Politechniki Wrocławskiej „Spalanie i paliwa”, pod redakcją Włodzimierza Kordylewskiego