

Rafał STRZALKA, Roman ULBRICH<sup>1</sup>, Ursula EICKER<sup>2</sup>

r.strzalka@po.opole.pl

<sup>1</sup> KATEDRA INŻYNIERII ŚRODOWISKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY, POLITECHNIKA OPOLSKA, OPOLE

<sup>2</sup> STUTTGART UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, STUTTGART

## Propozycja modelu procesu spalania biomasy w kotle rusztowym

### Wstęp

Biomasa jest obecnie czwartym co do wielkości na świecie źródłem energii i pokrywa około 10-15% światowego zapotrzebowania na energię [1,2]. Biomasa drzewna oraz odpady mają największy udział w produkcji energii z biomasy (64%) a ich bezpośrednie spalanie jest obecnie najważniejszym i najbardziej rozpowszechnionym sposobem wykorzystania potencjału biomasy [3]. Bezpośrednie spalanie biomasy w nowoczesnych instalacjach zapewnia wysoką efektywność, niskie emisje substancji szkodliwych oraz stanowi opłacalną ekonomicznie możliwość wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych [4]. Pomimo zalet biomasy jako nośnika energii istnieje nadal wiele problemów technicznych wynikających ze zmiennych właściwości paliwa takich jak zawartość wilgoci, wartość opałowa oraz niejednorodność rozmiaru i kształtu cząstek. Dodatkowym problemem związanym ze spalaniem biomasy są trudności z utrzymaniem stabilnego przebiegu procesu spalania wynikające ze złożoności automatycznego sterowania kotłami dużej mocy [5].

Spalanie w kotłach rusztowych jest najbardziej rozpowszechnioną technologią spalania biomasy, ponieważ tego typu instalacje pozwalają na wykorzystanie paliwa o zmiennych parametrach, a dodatkową ich zaletą są stosunkowo niskie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne [6]. Ze względu na szerokie zastosowanie palenisk rusztowych szczególne znaczenie ma analiza wpływu parametrów sterowania instalacją na przebieg procesu spalania w celu uzyskania stabilnego przebiegu procesu spalania a tym samym zwiększenia efektywności pracy instalacji. Matematyczne modelowanie procesów spalania biomasy jest w tym przypadku skutecznym narzędziem pozwalającym na przeanalizowanie wpływu właściwości paliwa oraz parametrów sterowania instalacją na przebieg procesu termicznego rozkładu biomasy w palenisku rusztowym [7].

Celem pracy jest przygotowanie modelu termicznego rozkładu biomasy na ruszcie, który będzie zawierał opis poszczególnych etapów procesu: suszenia, zgazowania oraz dopalenia pozostałego węgla drzewnego. Analiza procesu termicznego rozkładu biomasy oparta będzie na równaniach bilansu masy i energii dla poszczególnych sekcji rusztu, co pozwala na uproszczenie analizy kompleksowych przemian oraz wykorzystanie powstałego w ten sposób modelu do optymalizacji strategii sterowania przebiegiem procesu spalania w kotłach dużej mocy.

### Spalanie biomasy w palenisku rusztowym

Kotły biomasowe dużej mocy wyposażone są w ruchomy ruszt, którego zadaniem jest przesuwanie paliwa poprzez strefy spalania oraz doprowadzanie powietrza do poszczególnych sekcji strefy rusztowej. Komora spalania podzielona jest na dwie części, pierwotną, w której następuje zgazowanie paliwa przy niedoborze powietrza oraz wtórną, w której następuje dopalenie mieszanki gazowej z komory pierwotnej przy nadmiarze powietrza. Poprzez uzyskanie dobrych warunków mieszania produktów termicznego rozkładu paliwa na ruszcie z powietrzem w strefie wtórnej możliwa jest eksploatacja układu w szerokim zakresie mocy – od 30 do 100% mocy znamionowej – przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej efektywności spalania i niskich wartości emisji [8].

Termiczny rozkład biomasy na ruszcie paleniska przebiega zasadniczo w trzech etapach: suszenie, zgazowanie paliwa i dopalenie węgla drzewnego a ruszt podzielony jest na strefy odpowiadające poszczególnym etapom spalania z regulowaną ilością powietrza doprowadzanego do każdej z nich.

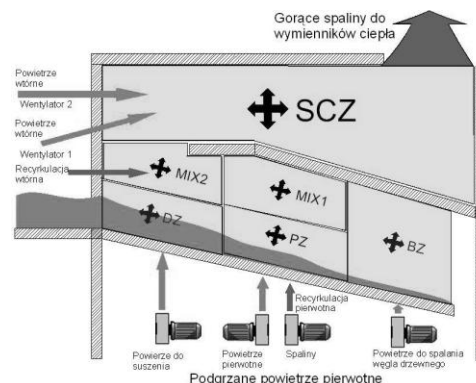
Po wprowadzeniu paliwa do komory spalania następuje jego podgrzanie oraz odparowanie wilgoci, przy stałej temperaturze w

strefie suszenia utrzymującej się na poziomie 100°C. Po odparowaniu wilgoci następuje szybki wzrost temperatury do poziomu 260°C, przy którym rozpoczyna się proces zgazowania biomasy oraz dochodzi do zapłonu paliwa na ruszcie [9]. Ponieważ biomasa zawiera stosunkowo dużą ilość substancji lotnych, znaczna jej część, nawet 85% masy paliwa ulega termicznemu rozkładowi w czasie gazyfikacji. Ostatnim etapem termicznego rozkładu biomasy jest dopalenie pozostałego węgla drzewnego, który stanowi około 15% masy paliwa.

### Matematyczny opis procesu spalania

W celu przygotowania matematycznego modelu procesu spalania biomasy, komorę spalania podzielono na strefy odpowiadające poszczególnym etapom procesu. Powstały w ten sposób model procesu spalania będzie składał się z sześciu stref:

- strefa suszenia (DZ) – nagrzewanie paliwa wraz z odparowaniem wilgoci
- strefa zgazowania (PZ) – gazyfikacja biomasy wraz z częściowym spalaniem substancji lotnych
- spalanie węgla drzewnego (BZ) – dopalenie powstałego węgla drzewnego
- strefa mieszania 1 (MIX 1) – mieszanie produktów zgazowania i spalania węgla
- strefa mieszania 2 (MIX 2) – mieszanie produktów gazowych ze strefy pierwotnej, początek spalania w strefie wtórnej
- strefa wtórna (SCZ) – dopalenie mieszanki gazowej w strefie wtórnej



Rys. 2. Podział komory spalania na strefy

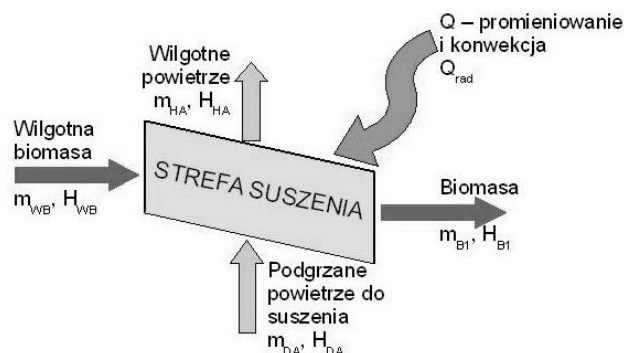
Profile temperatury w komorze spalania, szybkość termicznego rozkładu biomasy oraz skład mieszanki gazowej zależy przy tym w głównej mierze od przebiegu termicznego rozkładu biomasy na ruszcie [10]. Dlatego też głównym celem pracy jest analiza termicznego rozkładu biomasy w strefie pierwotnej, która stanowić będzie podstawę do dalszej analizy procesu spalania biomasy w palenisku rusztowym.

### Odparowanie wilgoci

Proces odparowania wilgoci zużywa znaczną część energii chemicznej paliwa co ma istotny wpływ na bilans energetyczny procesu spalania a także temperaturę w strefie reakcji. Spalanie wilgotnego paliwa prowadzi do opóźnienia momentu zapłonu paliwa oraz spowolnienia tempa reakcji spalania. Paliwa zawierające dużą ilość wilgoci charakteryzują się niską wartością opałową a ich spalanie prowadzi do zwiększenia ilości spalin co wiąże się z obniżeniem efektywności kotła [11].

Po wprowadzeniu paliwa do komory spalania, w której

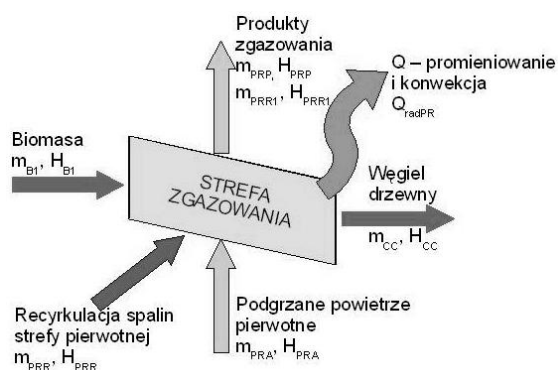
temperatura utrzymuje się na poziomie około 850°C, dochodzi do intensywnej wymiany ciepła pomiędzy obmurówką komory spalania a wilgotnym paliwem. Przyjęto, że głównym źródłem energii wykorzystywanej do podgrzania paliwa oraz odparowania wilgoci w początkowej fazie procesu spalania jest ciepło dostarczone drogą promieniowania [12]. Poniżej przedstawiono uproszczony schemat strefy suszenia. Na schemacie zaznaczono główne parametry termodynamiczne: strumienie entalpii, substancji oraz strumienie energii chemicznej paliwa.



Rys. 3. Schemat strefy suszenia paliwa

### Zgazowanie paliwa

Podobnie jak w przypadku strefy suszenia przygotowano uproszczony schemat strefy zgazowania uwzględniający główne strumienie energii.



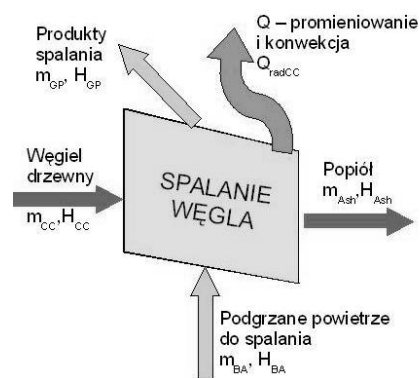
Rys. 4. Schemat strefy zgazowania paliwa

Termiczny rozkład biomasy w strefie zgazowania rozpoczyna się w momencie zapłonu paliwa i trwa do momentu kiedy paliwo na ruszcie nie zawiera już wilgoci i substancji lotnych. Ocenia się, że odparowanie reszty wilgoci zawartej w paliwie oraz uwolnienie substancji lotnych w strefie zgazowania zajmuje około 70% czasu trwania procesu spalania biomasy [13]. Mieszanka gazów stanowiąca produkt termicznego rozkładu paliwa wchodzi w reakcję z powietrzem pierwotnym dostarczonym do tej strefy. Ze względu na niedobór tlenu w strefie zgazowania następuje jedynie częściowe spalanie substancji lotnych, a towarzyszące temu reakcje mają bilans egzotermiczny, co prowadzi do wzrostu temperatury w tej strefie.

### Dopalenie węgla drzewnego

Produktem końcowym zgazowania paliwa w strefie pierwotnej jest węgiel drzewny, składający się w 90% z czystego węgla, który zostaje dopalony w ostatnim etapie termicznego rozkładu paliwa na ruszcie. Głównymi produktami utleniania węgla są tlenek węgla CO oraz dwutlenek węgla CO<sub>2</sub>. Biomasa zawiera około 15% węgla drzewnego, a ilość węgla spalane w ostatnim etapie termicznego rozkładu biomasy na ruszcie waha się w granicach 20 do 85% całkowitej ilości węgla drzewnego zawartego w paliwie. Reakcja spalania węgla przebiega znacznie wolniej od reakcji zgazowania, a jego dopalenie zajmuje około 20% czasu trwania procesu spalania biomasy [14]. Ilość ciepła wygenerowanego w wyniku spalania

węgla drzewnego wpływa w znaczny sposób na czas upływający do momentu zapłonu paliwa i jest uzależniona głównie od stosunku ilościowego produktów reakcji (CO i CO<sub>2</sub>).



Rys. 5. Schemat strefy dopalenia węgla drzewnego

### Wnioski

W celu spełnienia wymagań technologicznych odnoszących się do efektywności wykorzystania energii chemicznej paliwa w paleniskach rusztowych na biomase oraz opłacalności wdrażania nowych projektów, konieczna jest systematyczna modyfikacja i optymalizacja instalacji do spalania. Zaprezentowany model matematyczny termicznego rozkładu biomasy w palenisku rusztowym zostanie wykorzystany do analizy pracy systemów spalania biomasy w warunkach rzeczywistych w oparciu o długookresowy monitoring instalacji do produkcji ciepła grzewczego i energii elektrycznej w układem ORC o mocy rzędu kilkunastu MW [15, 16]. Opracowany model matematyczny stanowi podstawę analizy procesu spalania przy uwzględnieniu poszczególnych pozycji bilansu energetycznego, który musi być spełniony w każdej chwili pracy układu. Rozwiązanie równań bilansowych pozwoli na określenie wpływu parametrów sterowania instalacją jak również wpływu właściwości paliwa takich jak wartość opałowa i zawartość wilgoci na przebieg procesu. Wyniki przeprowadzonych analiz pozwolą na ogólne określenie charakterystyki procesu termicznego rozkładu biomasy w palenisku rusztowym.

**Praca finansowana ze środków Komisji Europejskiej w ramach 6 Programu Ramowego. Autorzy pragną podziękować za wsparcie finansowe w ramach Projektu Marie Curie (numer kontraktu: MRTN-CT-2006-033489, CITYNET).**

### LITERATURA

- [1] A. Faaij: Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. **11**, 343-375 (2006).
- [2] A. Demirbas: Progress in Energy and Combustion Science. **30**, 219-230 (2004).
- [3] D. Merghini et al.: Experimental Thermal and Fluid Science. **32**, 1371-1380 (2008).
- [4] T. Nussbaumer: Energy & Fuels. **17**, 1510-1521 (2003).
- [5] R. Bauer et al.: Biomass & Bioenergy. **30**, 1-11 (2010).
- [6] C. Yin et al.: Progress in Energy and Combustion Science. **34**, 725-754 (2008).
- [7] R. Johansson et al.: Combustion and Flame. **149**, 49-62 (2007).
- [8] S. van Loo, J. Koopejan: Biomass combustion and co-firing. Earthscan, London 2008.
- [9] Y. B. Yang et al.: Fuel. **84**, 2026-2038 (2005).
- [10] R. P. van der Lans: Biomass & Bioenergy. **19**, 199-208 (2000).
- [11] L. Liang et al.: Bioresource Technology. **99**, 7238-7246 (2008).
- [12] Y. B. Yang et al.: Fuel. **82**, 2205-2221 (2003).
- [13] Y. B. Yang et al.: Fuel. **83**, 1553-1562 (2004).
- [14] M. Kaltschmitt et al.: Energie aus Biomasse. Springer, Berlin 2009.
- [15] R. Strzalka, R. Ulbrich, U. Eicker: Materiały konferencyjne 21<sup>st</sup> ECOS, Kraków 2008, 669-676
- [16] R. Strzalka, R. Ulbrich, U. Eicker: Materiały konferencyjne 17<sup>th</sup> EBC, Hamburg 2009, 2167-2171