

Wykorzystanie biomasy w energetyce

The use of biomass in the energy sector

Marta Gburzyńska, Aleksandra Pikus^{*)}

Słowa kluczowe: *biomasa, kotły na biomasę, konwersja biomasy, wykorzystanie biomasy, matematyczny model procesu spalania biomasy.*

Streszczenie

W artykule zawarte są informacje na temat charakterystyki biomasy. Opisano wybrane rośliny przeznaczone do produkcji biomasy oraz podział biomasy przeznaczonej do celów energetycznych na grupy i sposoby konwersji biomasy na biopaliwa. Kolejną część poświęcono jest kotłom na biomasę, ich rodzajom, zmechanizowaniu i zasadzie działania. Ostatnim etapem jest opis modelu matematycznego procesu spalania biomasy.

Keywords: *biomass, biomass boilers, biomass conversion, biomass utilization, mathematical model of the biomass combustion process.*

Abstract

The article provides information about the characteristics of biomass. It describes selected plants intended for biomass production, categorizes biomass for energy purposes into groups, and discusses methods of converting biomass into biofuels. The next section focuses on biomass boilers, their types, mechanization, and operational principles. The final stage involves the description of a mathematical model for the biomass combustion process.

Wprowadzenie

W artykule omówiono istotne aspekty dotyczące biomasy. Artykuł rozpoczyna się od przedstawienia charakterystyki biomasy, opisując jej cechy i właściwości. Następnie autorzy analizują różne rodzaje biomasy, zwracając uwagę na różnice między nimi i ich potencjał jako źródła energii odnawialnej. Kolejny obszar skupia się na metodach konwersji biomasy na biopaliwa, przedstawiając różne procesy i technologie wykorzystywane do przekształcania biomasy w energię. Przywołane są aspekty efektywności energetycznej oraz wpływu na środowisko. Artykuł również poświęca uwagę kotłom na biomasę, prezentując różne rodzaje kotłów oraz zasady ich działania. Omawiane są mechanizmy i technologie związane z kotłami na biomasę, co może być istotne w kontekście wykorzystania biomasy do produkcji ciepła i energii. Ostatnia część artykułu koncentruje się na matematycznym modelu procesu spalania biomasy. Przedstawia on teoretyczne podstawy spalania biomasy i pomaga w zrozumieniu tego procesu. Model ten może stanowić narzędzie do analizy i optymalizacji procesów związanych z wykorzystaniem biomasy w produkcji energii. Całokształt artykułu dostarcza wszechstronnej wiedzy na temat biomasy, od jej cech po konkretne technologie wykorzystywane do przetwarzania i wykorzystania tej surowców odnawialnego w dziedzinie energetyki.

1. Charakterystyka biomasy

Biomasa jest jednym z najstarszych, a jednocześnie jednym z najłatwiejszych do pozyskania i najchętniej wykorzystywanym odnawialnym źródłem energii. Jest to wszelkiego rodzaju, ulegająca rozkładowi, materia organiczna, czyli surowce pochodzenia zwierzęcego i roślinnego oraz odpady biologiczne [11]. Pod ter-

minem „biomasa” należy rozumieć więc każdą substancję pochodzenia organicznego, która jest produkowana przy pomocy energii słonecznej, dwutlenku węgla obecnego w atmosferze i wody pobieranej z gleby, ale może też powstawać w wyniku tzw. metabolizmu społecznego. Jest to efekt złożonego procesu, w którym dwutlenek węgla i woda są przekształcane w związki organiczne przy wykorzystaniu energii słonecznej, czyli poprzez fotosyntezę. Produkcja biomasy będzie trwać tak długo, jak długo słońce będzie emitować energię i światło, a gleba będzie spełniać niezbędne warunki do wzrostu roślin.

Biomasę można podzielić na różne rodzaje, w zależności od pochodzenia i stanu skupienia [20, 23]:

- Biomasa stała – w głównej mierze łączą się na nią substancje pochodzenia roślinnego, tj. drewno odpadowe, odpady przemysłowe, rolnicze i komunalne oraz rośliny pochodzące z upraw energetycznych.
- Biomasa ciekła – dotyczy głównie biopaliw, które powstają na skutek procesów chemicznych, jakim poddawane są rośliny będące dodatkiem do tradycyjnych paliw lub osobnych nośników energii.
- Biomasa gazowa – jest to biogaz, który powstaje na skutek biodegradacji odpadów organicznych, składa się on głównie z metanu i dwutlenku węgla.

Do produkcji biomasy można używać różnych surowców, takich jak:

- odpadów drewna z leśnictwa i przemysłu drzewnego, a także opakowań drewnianych,
- słomy z różnych roślin (zboża, roślin oleistych, roślin strączkowych) oraz siana,
- plonów z upraw roślin energetycznych,

* **Marta Gburzyńska**, mgr, Zakład Inżynierii Środowiska – Państwowa Akademia Nauk Stosowanych im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie, e-mail: marta.gburzynska@pansim.edu.pl; **Aleksandra Pikus**, inż., Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie

- odpadów organicznych, takich jak gnojowica, osady ściekowe, odpady z przemysłu celulozowo-papierniczego, a także odpadów organicznych z cukrowni, gorzelni i browarów,
- biopaliw płynnych stosowanych w transporcie, takie jak oleje roślinne, biodiesel i bioetanol pochodzący z gorzelni i rafinerii,
- biogazu wyprodukowanego z gnojowicy, osadów ściekowych i odpadów komunalnych na składowiskach.

Biomasę przeznaczoną na cele energetyczne można podzielić na kilka grup [16, 23, 30]

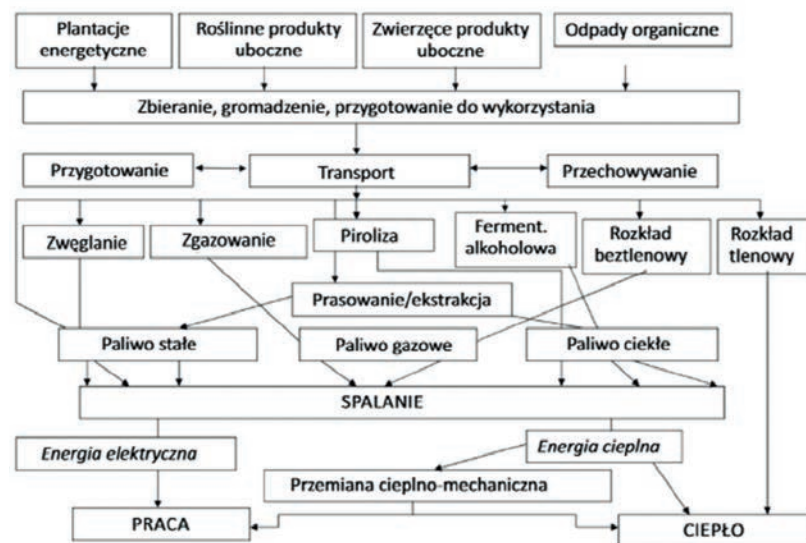
- Biomasa drzewna (dendromasa) – różnego rodzaju drzewa, łądygi, kora, trociny, brykiety, pellety.
- Biomasa zielona i rolnicza (agromasa) – trawy i kwiaty, słoma, łądygi, włókna, łuski, plewy, pestki, pozostałości (kolby, wyłoki, pasze, pulpy).
- Biomasa wodna – okrzemki, rzęski, wodorosty.
- Odpady biomasy pochodzenia zwierzęcego i ludzkiego – nawóz, kości, ściółka drobiowa, mączka mięsno – kostna.
- Zanieczyszczona biomasa i biomasa przemysłowa – odpady z tektury, płyty wiórowe i pilśniowe, palety, sklejki.
- Mieszanki biomasy.

Właściwości biomasy mają kluczowe znaczenie dla jej wykorzystania energetycznego. Należą do nich:

- Skład chemiczny – zawartość węgla, wodoru, tlenu, azotu, siarki.
- Wartość opałowa – ilość energii możliwej do uzyskania z jednostki masy biomasy.
- Wilgotność – zawartość wody w biomacie, która wpływa na efektywność spalania.
- Zawartość substancji lotnych: wpływa na proces spalania i emisję zanieczyszczeń.
- Ilość popiołu – resztki po spaleniu biomasy, które mogą mieć znaczenie w kontekście utylizacji i wpływu na środowisko.
- Gęstość – wpływa na magazynowanie, transport i przetwarzanie biomasy.

3. Sposoby konwersji biomasy

Wybór metody i technologii wytwarzania energii z biomasy jest ściśle uzależniony od określonych kryteriów, które obejmują wysoką efektywność cieplną, minimalną emisję zanieczyszczeń do atmosfery oraz ograniczoną ilość pozostałości po spalaniu. Kluczowe dla tych kryteriów są właściwości samego paliwa, takie jak jego skład chemiczny, wartość opałowa, wilgotność, zawartość substancji lotnych, ilość popiołu oraz gęstość. Te cechy mają największy wpływ na spełnienie powyższych wymagań.



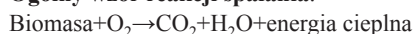
Rys. Sposoby konwersji biomasy roślinnej na biopaliwa [22, 25].
Fig. Conversion methods of plant biomass into biofuels [22, 25].

Na schemacie (rys.) przedstawione są różne sposoby konwersji biomasy na energię i inne produkty. Podzielone są na trzy główne kategorie: mechaniczne, termiczne i biochemiczne. Poniżej znajduje się szczegółowy opis każdego procesu.

Mechaniczne sposoby konwersji biomasy

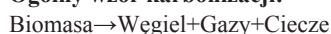
- **Zrębkowanie** – proces mechanicznego rozdrabniania drewna i innych materiałów roślinnych na małe kawałki zwane zrębkami. Jest to wstępny etap przygotowania biomasy do dalszego przetwarzania.
- **Prasowanie** – proces mechaniczny, w którym biomasa jest sprasowywana, w celu zmniejszenia jej objętości i zwiększenia gęstości energetycznej. Prasowanie może być stosowane do tworzenia brykietów.
- **Brykietowanie** – proces formowania biomasy w brykiety poprzez prasowanie pod wysokim ciśnieniem. Brykiety mają większą gęstość energetyczną niż surowa biomasa, co ułatwia ich transport i magazynowanie.
- **Pelletowanie** – proces produkcji pelletów, czyli małych cylindrycznych kawałków biomasy, poprzez prasowanie biomasy w specjalnych urządzeniach zwanych pelletizerami. Pellety mają wysoką gęstość energetyczną i są łatwe do transportu i magazynowania.
- **Termiczne sposoby konwersji biomasy**
- **Spalanie** – proces utleniania biomasy w obecności tlenu, prowadzący do wytworzenia ciepła, dwutlenku węgla i wody. Spalanie jest najprostszym i najstarszym sposobem konwersji biomasy na energię.

Ogólny wzór reakcji spalania:



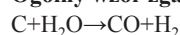
- **Karbonizacja** – proces termiczny, w którym biomasa jest przekształcana w węgiel drzewny w warunkach beztlenowych. Karbonizacja prowadzi do powstania stałego paliwa o wysokiej zawartości węgla.

Ogólny wzór karbonizacji:



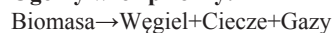
- **Zgazowanie** – proces przekształcania biomasy w gaz palny (głównie mieszaninę wodoru, metanu, tlenku węgla i dwutlenku węgla) poprzez ogrzewanie w warunkach beztlenowych lub przy ograniczonej ilości tlenu [12].

Ogólny wzór zgazowania:



- **Pielizacja** – termiczny rozkład biomasy na gaz, smołę i węgiel drzewny w warunkach beztlenowych. Produkty pielizacji mogą być dalej przetwarzane na paliwa lub chemikalia [17].

Ogólny wzór pielizacji:



Biochemiczne sposoby konwersji biomasy

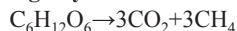
- **Fermentacja etanolowa** – proces biochemiczny, w którym cukry zawarte w biomacie są przekształcane w etanol przez mikroorganizmy (drożdże).

Ogólny wzór fermentacji etanolowej:



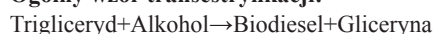
- **Fermentacja metanolowa** – proces podobny do fermentacji etanolowej, ale produktem końcowym jest metanol zamiast etanolu.
- **Fermentacja anaerobowa** – proces biologiczny, w którym mikroorganizmy rozkładają biomasę w warunkach beztlenowych, wytwarzając biogaz (głównie metan i dwutlenek węgla).

Ogólny wzór fermentacji anaerobowej:



- **Transestryfikacja** – proces chemiczny, w którym oleje roślinne lub zwierzęce są przekształcane w biodiesel poprzez reakcję z alkoholem (zazwyczaj metanolem lub etanolem) w obecności katalizatora.

Ogólny wzór transestryfikacji:



4. Charakterystyka kotłów na biomasę

Kotły na biomasę są kluczowymi urządzeniami stosowanymi w energetyce odnawialnej, przekształcając biomasę w energię cieplną. Charakteryzują się różnorodnością konstrukcji i sposobów działania, co pozwala na optymalne wykorzystanie różnych rodzajów biomasy. Poniżej omówiono podstawowe rodzaje kotłów na biomasę oraz ich specyfikację techniczną.

Kotły spalające biomasę można podzielić na te z załadunkiem ręcznym oraz zmechanizowane kotły z podajnikiem. Kotły do spalania drewna to kotły wsadowe, które dalej można podzielić na te ze spalaniem dolnym, górnym, które mogą być także wykorzystywane do spalania brykietów. Do spalania zrębków drzewnych i pelletów wykorzystuje się kotły z automatycznym podajnikiem. Kotły na biomasę wyposażone w automatyczne podajniki paliwa są często wybierane do spalania przetworzonej biomasy, takiej jak pellety lub ekogroszek. W zależności od rodzaju paliw i podajników, możemy wyróżnić różne typy kotłów na biomasę [14]:

- Kotły retortowe optymalne do spalania ekogroszku.
- Kotły rynnowe – uniwersalne i zdolne do spalania różnych paliw, takich jak ekogroszek, pellet, miał kwalifikowany oraz owsa.
- Kotły schodkowe – charakteryzują się wieloetapowym procesem spalania, co umożliwia korzystanie z pelletu niższej jakości.
- Kotły szufladowe – przystosowane do spalania paliw takich jak ekogroszek lub miał;
- Kotły zrzutkowe – najczęściej spotykane w kotłach na pellet, często wyposażone w automatyczne czyszczenie rusztu w celu zapobiegania tworzeniu się spieków.
- Kotły rurowe – w tym przypadku pellet jest podawany w małych ilościach na palnik za pomocą rury.

Do najistotniejszych parametrów kotłów należą sprawność energetyczna oraz moc energetyczna. Sprawność energetyczna kotła jest stosunkiem ilości wykorzystanej energii pierwotnej do 1 kWh wytworzonej energii użytkowej. Im kocioł jest tańszy w użytkowaniu i bardziej ekologiczny dla środowiska, tym wyższa jest jego sprawność energetyczna. Podwyższone zużycie energii jest skutkiem niskiej sprawności urządzenia grzewczego. Sprawność energetyczna powinna być jednym z warunków, jakim należy się kierować przy wyborze kotła, gdyż ma to związek z późniejszymi kosztami eksploatacji. Jednym z kluczowych czynników, który wpływa na sprawność energetyczną kotłów, jest ich konstrukcja i materiał z jakiego został wykonany. Wartość efektywności energetycznej kotłów na paliwo stałe to 70-80%, kotłów zasilanych olejem opałowym lub gazem – mają sprawność średnioroczną 80-88%, natomiast nowoczesne kotły kondensacyjne należą do najsprawniejszych urządzeń grzewczych i osiągają one efektywność energetyczną od 95 do 98% [15].

Kocioł, który pracuje na potrzeby ogrzewania budynku, powinien mieć moc równą bądź większą od zapotrzebowania budynku na ciepło o 10%, ale tylko w przypadku, gdy stosowane paliwo jest dobrej jakości. Sprawność różnych typów kotłów w zależności od temperatury zewnętrznej i obciążenia kotła może się różnić. Ogólnie rzecz biorąc, sprawność kotłów może zmieniać się w zależności od temperatury na zewnątrz i zapotrzebowania na ciepło.

- **Sprawność sezonowa** – kotły często mają sprawność sezonową, co oznacza, że ich sprawność może się zmieniać w ciągu roku, w zależności od temperatury na zewnątrz. W okresie chłodniejszym, kiedy temperatura jest niższa, kotły zazwyczaj pracują z wyższą sprawnością, ponieważ muszą pracować ciężiej, aby dostarczać ciepło. W okresie łagodniejszej pogody sprawność może być niższa, ponieważ potrzeba mniej energii.
- **Sprawność przy częściowym obciążeniu** sprawność kotła może również zmieniać się w zależności od obciążenia cieplnego. Wiele nowoczesnych kotłów jest zaprojektowanych do regulacji mocy, w zależności od zapotrzebowania na ciepło. Kiedy obciążenie jest niskie, mogą pracować przy niższej mocy, utrzymując przy tym wyższą sprawność. Jednak gdy obciążenie jest wysokie i kocioł pracuje na pełną moc, sprawność może nieco spadać.
- **Typ kotła** – rodzaj kotła również odgrywa istotną rolę. Kotły kondensacyjne np., są znane z wyższej sprawności, zwłaszcza przy częściowym obciążeniu, ponieważ potrafią odzyskiwać ciepło z gazów spalinowych. Kotły tradycyjne mogą charakteryzować się stosunkowo stabilnym poziomem sprawności, niezależnie od obciążenia, ale zazwyczaj są mniej wydajne.
- **Kompensacja pogodowa** – niektóre zaawansowane systemy kotłów używają sterowników kompensacji pogodowej do dostosowywania temperatury wody grzewczej, w zależności od temperatury na zewnątrz. To może pomóc utrzymać wysoką sprawność, optymalizując pracę kotła zgodnie z warunkami pogodowymi.

W zależności od typu kotła i zastosowanej technologii, efektywność energetyczna może się różnić. Wartość efektywności energetycznej kotłów jest kluczowym czynnikiem przy wyborze odpowiedniego urządzenia grzewczego, wpływającym na koszty eksploatacji i ekologiczność systemu grzewczego [13, 23].

5. Modele matematyczne procesu spalania biomasy

Spalanie biomasy to proces termiczny, w którym biomasa, czyli organiczne materiały pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego ulegają utlenieniu w obecności tlenu, wydzielając energię w postaci ciepła. Aby zoptymalizować i kontrolować ten proces, stosuje się różne modele matematyczne, które opisują zachodzące reakcje chemiczne, transport ciepła oraz masy wewnątrz cząstek biomasy. Matematyczne modele teoretyczne, opisujące zjawiska i reakcje zachodzące podczas spalania przedstawiono w [8, 28, 32], uproszczony model oparty na bilansie substancji opisany został w [26]. Najważniejsze schematy kinetyczne, zaproponowane przez różnych badaczy, to model Broido-Shafizadeha [4, 5], podejście Koufopanos-Srivastavy [18, 29] oraz koncept Thurnera i Mana [31]. Warto również wspomnieć o złożonym modelu hybrydowym, stworzonym przez Ranzi, który został później udoskonalony przez Gauthiera [9]. Model Millera-Bellana to jedno z nielicznych podejść do rozkładu termicznego biomasy o uniwersalnym zastosowaniu [22]. Bazując na idei efektu superpozycji, jest to hybrydowy model, który równocześnie uwzględnia rozkład głównych składników poprzez konkurencyjne reakcje. W ostatnich latach podjęto próby dalszego usprawnienia tego mechanizmu przez Blondeau [3]. Ze względu na liczne korzyści, wynikające z wykorzystania modelu Millera-Bellana, został on również opisany w [21]. Dostępne są liczne obszernie przegląd numerycznego modelowania rozkładu biomasy, w tym prace Moghtaderiego [24] i Di Blasiego [6]. Zgodnie z ich praca-

mi, istniejące modele można podzielić na trzy główne kategorie, ze względu na złożoność wymiarową: modele 1D [1, 2, 19], modele 2D [7], modele 3D [33].

Model spalania biomasy uwzględnia następujące założenia [10, 27]:

- Częsteczka biomasy składa się z wielu komponentów, w tym ciał stałych, gazów i cieczy.
- Wszystkie komponenty znajdują się w równowadze termicznej.
- Geometria cząsteczki może być kulista, cylindryczna lub płytowa.
- Gazy wewnątrz porowatej struktury cząsteczki podlegają prawu gazu doskonałego.
- Transport pędu w cząsteczce jest opisany prawem Darcy'ego.
- Pomija się jednorodne reakcje gazowe wewnątrz cząsteczki.

Etapy procesu spalania biomasy:

1. Proces suszenia:

$$\frac{\partial \rho_{bm}(r, t)}{\partial t} = -R_m \quad (1)$$

gdzie:

$\rho_{bm}(t)$ – gęstość biomasy w punkcie r i czasie t ,
 R_m – szybkość suszenia.

2. Proces pirolizy:

$$\frac{\partial \rho_{bm}(r, t)}{\partial t} = -R_m - R_v - R_c \quad (2)$$

gdzie:

R_v – szybkość uwalniania substancji lotnych,
 R_c – szybkość tworzenia się węgla.

3. Spalanie właściwe:

- Utlenianie węgla drzewnego i gazów powstałych podczas pirolizy:

$$\frac{\partial \rho_c(r, t)}{\partial t} = \omega_c = R_c - R_{CO_2} - R_{CCO_2} - R_{CH_2O} \quad (3)$$

gdzie:

$\rho_c(r, t)$ – gęstość węgla w punkcie i i czasie t ,
 $R_{CO_2}, R_{CCO_2}, R_{CH_2O}$ – reakcje spalania węgla.

4. Równania opisujące procesy

- Zmiana gęstości cząsteczki opisana równaniem (2).
- Zmiana masy węgla opisana równaniem (3).
- Reakcje heterogeniczne węgla:

$$R_{Ci} = \frac{M_c}{\Omega M_j} S_{char} A_i T e^{\left(-\frac{E_i}{RT}\right)} \rho_j, \quad (4)$$

gdzie:

i – numer reakcji $R_{CO_2}, R_{CCO_2}, R_{CH_2O}$,

$j = O_2, CO_2, H_2O$,

Ω – współczynnik stechiometryczny,

S_{char} – specyficzna powierzchnia wewnętrzna struktury porowatej węgla,

M – masa cząsteczkowa.

5. Równanie zachowania składników gazowych:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_g Y_i) + \frac{1}{G(r)} \frac{\partial}{\partial r} (G(r) \varepsilon \rho_g u_g Y_i) = \frac{1}{G(r)} \frac{\partial}{\partial r} (G(r) \varepsilon \rho_g D_{eff} \frac{\partial Y_i}{\partial r}) + \omega_i \quad (5)$$

$$i = O_2, N_2, CO, CO_2, H_2O, CH_4, H_2$$

gdzie:

ε – porowatość,

ρ_g – gęstość gazu w cząsteczce,

u_g – prędkość gazu w cząsteczce,

Y_i – ułamek masowy gazu w fazie gazowej i ,

D_{eff} – efektywna dyfuzja gazu w cząsteczce,

$G(r)$ – współczynnik Lamé.

5. Parametry i stałe kinetyczne

Model matematyczny opiera się na dokładnych wartościach parametrów i stałych kinetycznych. Stałe te są określane na podstawie badań eksperymentalnych i obejmują:

- Współczynniki przedeksponencjalne A_i ,
- Energie aktywacji E_i ,
- Parametry opisujące właściwości fizyczne i chemiczne biomasy oraz produktów pirolizy i spalania.

6. Procesy pirolizy

Proces pirolizy i reakcje spalania/zgazowania węgla oraz odpowiadające współczynniki kinetyczne przedstawiono w tabeli

Tabela Reakcje pirolizy i reakcje charakterystyczne oraz stałe kinetyczne [10].
 Table Pyrolysis and char reactions and kinetic constants [10].

Reakcja	A_j	E_j [kJ/mol]
biomasa → gaz	4.4×10^9	153
biomasa → smoła	1.1×10^{10}	148
biomasa → węgiel	3.3×10^6	112
smoła → gaz	4.5×10^6	110.1
smoła → węgiel	1.0×10^5	107.5
$C + 0.5O_2 \rightarrow CO$	$0.658 \times T$ [m/s]	74.8
$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	$3.42 \times T$ [m/s]	130
$C + H_2O \rightarrow CO + H_2O$	$3.42 \times T$ [m/s]	130

Wartości A_j reprezentują współczynniki przedeksponencjalne, natomiast E_j [kJ/mol] to energie aktywacji odpowiednie dla poszczególnych reakcji pirolizy, spalania i zgazowania węgla. Wartości te są istotne w modelowaniu tych reakcji i opisują zależności kinetyczne między temperaturą a szybkością reakcji.

7. Proces suszenia

- Model parowania strumienia ciepła:

$$R_m = \begin{cases} \left(\frac{1}{G(r)} \frac{\partial}{\partial r} (G(r) \varepsilon \rho_g u_g c_{p,g} T - G(r) k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}) \right) \frac{1}{Lt} & \text{dla } T \geq T_{eva}, \\ 0 & \text{dla } T < T_{eva} \end{cases} \quad (6)$$

gdzie:

Lt – ciepło właściwe parowania wody,

T_{eva} – temperatura parowania wody.

- Model równowagi i przepływu ciepła w procesie suszenia w dowolnej temperaturze:

$$R_m = h_{m,vap} S_p (\rho_{w,sat} - \rho_{H_2O,\infty}), \quad (7)$$

gdzie:

$h_{m,vap}$ – współczynnik przenikania masy pary wodnej,

$\rho_{w,sat}$ – nasylenie gęstości pary,

$\rho_{H_2O,\infty}$ – gęstość cząstkowa pary wodnej,

S_p – powierzchnia właściwa.

Tempo parowania:

$$R_m = \rho_m A_{eva} e^{-\frac{E_{eva}}{RT}}, \quad (8)$$

gdzie:

A_{eva} – współczynnik przedeksponencjalny,

E_{eva} – energia aktywacji związana z parowaniem.

Przedstawiono szczegółowy opis matematycznego modelu spalania biomasy, obejmujący założenia modelu, etapy procesu (suszenie, piroliza, spalanie), równania opisujące te procesy, parametry i stałe kinetyczne oraz zastosowania modelu. Taka struktura zapewni kompleksowe zrozumienie i optymalizację procesu spalania biomasy.

Podsumowanie

Wykorzystanie biomasy stanowi istotny element zrównoważonego rozwoju kraju. To wykorzystanie będzie uzależnione od obowiązujących strategicznych dokumentów Unii Europejskiej oraz krajowych. Te działania mają na celu wspieranie rozwoju Odnawialnych Źródeł Energii (OZE) i zwiększenie udziału energii produkowanej z tych źródeł w ogólnym bilansie produkcji energii. W rezultacie przyczyni się to do poprawy stanu środowiska, poprzez redukcję emisji szkodliwych gazów do atmosfery, zwiększenie efektywności energetycznej u odbiorcy końcowego oraz realizację szerszych celów związanych z zrównoważonym rozwojem.

W wyniku spalania biomasy otrzymuje się ciepło, z którego można pozyskać energię elektryczną, mechaniczną, czy też ciepłą, a wykorzystanie biomasy jako nośnika energii ma wiele zalet ekonomicznych, społecznych i ekologicznych. Wykorzystanie biomasy, jako paliwa w kotłach, przynosi korzyści dla środowiska. Istnieje szereg różnych rozwiązań dotyczących instalacji do spalania biomasy lub współspalania jej z innymi paliwami. Wybór odpowiedniej technologii spalania zależy od mocy danej instalacji, właściwości samej biomasy (jak jej skład chemiczny, zawartość substancji lotnych, wilgotność, wartość opałowa, gęstość itp.) oraz od tego, w jakiej formie jest dostarczana (może to być drewno kawałkowe, zrębki, brykiety, pellety, pył, baloty itp.). Kotły przeznaczone do spalania biomasy są klasyfikowane na te, w których paliwo jest ręcznie załadowywane (partiami), oraz te z automatycznym podawaniem biomasy.

Praca koncentrowała się na charakterystyce biomasy, z uwzględnieniem rodzajów biomasy oraz sposobów konwersji biomasy. W artykule przedstawiono charakterystykę kotłów na biomasę. W pracy opisano także model matematyczny procesu spalania biomasy.

LITERATURA

- [1] Babu B.V., Chaurasia, A.S. 2004. "Pyrolysis of biomass: Improved models for simultaneous kinetics and transport of heat, mass and momentum." *Energy Convers. Manag.* 45 : 1297–1327.
- [2] Bamford C.H., Crank, J., Malan, D.H. 1946. "The combustion of wood. Part I. In Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society"; *Cambridge University Press: Cambridge, UK.* 42 : 166–182.
- [3] Blondeau, J., Jeanmart H. 2011. "Biomass pyrolysis in pulverized-fuel boilers: Derivation of apparent kinetic parameters for inclusion in CFD codes." *Proc. Combust. Inst.* (33) : 1787–1794.
- [4] Bradbury A.G.W., Sakai Y. 1979. Shafizadeh, F." A kinetic model for pyrolysis of cellulose". *J. Appl. Polym. Sci.* (23) : 3271–3280.
- [5] Broido A., Nelson M.A. 1975. "Char yield on pyrolysis of cellulose". *Combust. Flame*(24) : 263–268.
- [6] Di Blasi C., 2008. "Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis". *Prog. Energy Combust. Sci.* (34) : 47–90.
- [7] Di Blasi C. 1998. "Physico-chemical processes occurring inside a degrading two-dimensional anisotropic porous medium". *Int. J. Heat Mass Transf.* (41) : 4139–4150.
- [8] Frączek J., Francik S., Ślipek Z. 2012. „Uwarunkowania spalania i współspalania biomasy” : 206.
- [9] Gauthier, G., Melkior T., Salvador, S. Corbetta, M., Frassoldati, A., Pierucci, S., Ranzi, E., Bennadji, H., Fisher, E.M. 2013. "Pyrolysis of Thick Biomass Particles: Experimental and Kinetic Modelling". *Chem. Eng. Trans.* (32) : 601–606.
- [10] Hesam Fatehi, Xue – Song Bai. 2014. A comprehensive mathematical model for biomass combustion". *Combustion Science and Technology.*
- [11] Hmielowiec M. 2020." Biomasa jako źródło energii odnawialnej w UE i w Polsce – zagadnienia ekonomiczno – prawne". *Energia Gigawat.* 5/2020. : 1.
- [12] <https://www.cire.pl>
- [13] <https://www.fachowyinstalator.pl>
- [14] <https://instsani.pl>
- [15] <https://kotly-wozniak.pl>
- [16] <https://magazynbiomasa.pl>
- [17] Holtzer M., Kmita A., Roczniak A. 2016." Procesy pirolizy i ich wpływ na jakość odlewów oraz na warunki pracy". AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie : 176.
- [18] Koufopoulos C.A., Lucchesi A., Maschio, G. 1989. „Kinetic modelling of the pyrolysis of biomass and biomass components". *Can. J. Chem. Eng.* (67) : 75–84.
- [19] Koufopoulos C.A., Papayannakos, N., Maschio, G., Lucchesi, A. 1991." Modelling of the pyrolysis of biomass particles. Studies on kinetics, thermal and heat transfer effects". *Can. J. Chem. Eng.* (69) : 907–915.
- [20] Kowalik P. 2003."Wykorzystanie biomasy jako surowca energetycznego. [w:] Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy". red. Ściążko M., Zieliński H. wyd. Instytutu chemicznej Przeróbki węgla.: 39–41.
- [21] Mahu R. 2013. "Numerical Study of Biomass Combustion Physical & Chemical Processes. Ph.D. Thesis, "Dunărea de Jos" University of Galați, Galați, Romania.
- [22] Miller R.S., Bellan, J. A., 1997. "Generalized Biomass Pyrolysis Model Based on Superimposed Cellulose", Hemicellulose and Lignin Kinetics. *Combust. Sci. Technol.* (126) : 97–137.
- [23] Mirowski T., Mokrzycki E., Uliasz-Boheńczyk A. 2018." Energetyczne wykorzystanie biomasy". Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk. Wydawnictwo IGSMiE PAN. : 22.
- [24] Moghtaderi B. 2006. "The state-of-the-art in pyrolysis modelling of lignocellulosic solid fuels". *Fire Mater.* (30) : 1–34.
- [25] Niedziółka I., Szpryngiel M. 2014." Możliwości wykorzystania biomasy na cele energetyczne." *Kwartalnik naukowy ISSN. Inżynieria Rolnicza.* 1429-7264 : 1.
- [26] Polák M., Neuberger P., Souček J. 2008." Experimental verifying of mathematic model for biomass combustion." *Annals of Warsaw University of Life Sciences. SGGW Agriculture, Agricultural and Forest Engineering.* 52.
- [27] Popescu F., Mahu R., Ion I. V., Rusu E.. 2020. "A Mathematical Model of Biomass Combustion Physical and Chemical Processes". *Energies* 13. (23) : 6232.
- [28] Porteiro, J., Miguez, J.L., Granada, E., Moran, J.C. 2006." Mathematical modeling of the combustion of a single wood particle". *Fuel Processing Technology.* 87.
- [29] Srivastava V., Sushil Jalan R. 1996." Prediction of concentration in the pyrolysis of biomass material—II." *Energy Convers. Manag.* ("37) : 473–483.
- [30] Szczukowski S., Stolarski M. 2013."Plantacje drzew i krzewów szybko rosnących jako alternatywa biomasy z lasu – stan obecny, szanse i zagrożenia rozwoju. [w:] Biomasa leśna na cele energetyczne. red. P. Gołos i A. Kaliszewki. Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa : 22–46.
- [31] Thurner, F., Mann, U. 1981. "Kinetic investigation of wood pyrolysis". *Ind. Eng. Chem. Process. Des. Dev.* 20 : 482–488.
- [32] Yang, Y.B., Sharifi, V.N., Swithenbank, J., Ma, L., Darvell, L.I., Jones, J.M. 2008." Pourkashanian, M., Williams, A. Combustion of a single particle biomass". *Energy and Fuels.* 22.
- [33] Yuen R.K.K., Yeoh, G.H., de Vahl Davis, G., Leonardi, E. 2007. "Modelling the pyrolysis of wet wood—I. Three-dimensional formulation and analysis". *Int. J. Heat Mass Transf.* 50 : 4371–4386.