

Sebastian WERLE¹

WYKORZYSTANIE SKONCENTROWANEGO PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO W PROCESIE PIROLIZY BIOMASY

USAGE OF THE CONCENTRATED SOLAR RADIATION IN THE BIOMASS PYROLYSIS PROCESS

Abstrakt: Wykorzystanie biomasy w Polsce ciągle wzrasta. Niemniej jednak występuje szereg ograniczeń związanych z produkcją biomasy, w szczególności rozwiązania prawne dotyczące ochrony przyrody oraz zasady bioróżnorodności upraw. Do celów energetycznych powinny być zatem wykorzystywane w pierwszej kolejności dostępne lokalnie produkty odpadowe z rolnictwa, przemysłu rolno-spożywczego, gospodarki przestrzennej i inne odpady biodegradowalne, jak chociażby osady ściekowe. Najpopularniejsze termiczne metody przeróbce tych materiałów w Polsce to spalanie i współspalanie, jednakże stosowanie tych procesów stwarza wiele problemów technicznych. Dodatkowo, zgodnie nową Ustawą o OZE pomoc finansowa dla współspalania została ograniczona. Fakty te powodują, że poszukuje się wciąż nowatorskich rozwiązań wykorzystujących biomasę w procesach termicznych. Przykładem takiego rozwiązania jest technologia pirolizy wykorzystująca energię słońca do etapu inicjacji (i podtrzymywania) procesu. Piroliza polega na termicznym przekształceniu materii organicznej (biomasy) bez obecności tlenu do postaci ciekłej, stałej i gazowej. W pracy przedstawiono analizę wybranych rozwiązań wykorzystania skoncentrowanego promieniowania słonecznego w procesie pirolizy biomasy odpadowej. Na tym tle przedstawiono koncepcję autorskiego rozwiązania instalacji do pirolizy słonecznej.

Słowa kluczowe: piroliza, biomasa, energia słońca, badania eksperymentalne

Wprowadzenie

W krajach Unii Europejskiej biomasa jest obecnie jednym z głównych źródeł energii odnawialnej stosowanym do produkcji ciepła, energii elektrycznej i dla celów transportowych [1]. Jej wykorzystanie szybko wzrasta. Jednakże istnieją uwarunkowania formalnoprawne, w szczególności dotyczące ochrony przyrody oraz zasad bioróżnorodności upraw, które pośrednio zmierzają do wprowadzenia ograniczeń w produkcji biomasy. Zmierzają one pośrednio do wprowadzenia ograniczeń w produkcji biomasy. Do celów energetycznych powinny być zatem wykorzystywane w pierwszej kolejności dostępne lokalnie produkty odpadowe z rolnictwa, przemysłu rolno-spożywczego, gospodarki przestrzennej i inne odpady biodegradowalne, jak chociażby osady ściekowe [2-5].

W Polsce roczny potencjał energetyczny biomasy, którą można zagospodarować, to [1]:

- ponad 20 mln Mg słomy odpadowej,
 - ok. 4 mln Mg odpadów drzewnych,
 - ok. 6 mln Mg osadów ściekowych.
- Ilość ta stanowi ekwiwalent 15-20 mln Mg węgla.

¹ Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska, ul. S. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice, tel. 32 237 29 83, fax 32 237 28 72, email: sebastian.werle@polsl.pl

*Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole'15, Jarnołtówek, 14-16.10.2015

Termiczne metody wykorzystania biomasy odpadowej od wielu lat zyskują na znaczeniu. Głównym powodem tego stanu rzeczy jest konieczność spełnienia unijnych wymagań, według których państwa członkowskie muszą zapewnić już w 2020 roku min. 15% udziału zielonej energii w konsumpcji finalnej [6]. Wśród termicznych metod utylizacji wyróżnić można spalanie (i współspalanie), zgazowanie i pirolizę [7]. Bezpośrednie spalanie biomasy odpadowej z akceptowalną ekonomicznie i ekologicznie sprawnością energetyczną wymaga zastosowania odpowiednich rozwiązań technicznych instalacji energetycznej, przystosowanej do spalania paliwa o wysokim udziale części lotnych, jakim jest biomasa. Pomimo stwierdzonych korzystnych efektów ekologicznych, ekonomicznych i społecznych, stosowanie biomasy stwarza wiele problemów technicznych, z których najważniejsze to: (1) szeroki przedział wilgotności powodujący trudności ze stabilizacją spalania, (2) obecność metali alkalicznych w biomacie wymuszająca stosowanie odpowiednich urządzeń usuwających popiół z instalacji kotłowych, (3) mała gęstość utrudniająca transport i magazynowanie, (4) wysoka zawartość części lotnych powodująca szybki i trudny do kontroli przebieg procesu spalania, (5) stosunkowo niska wartość opału, (6) niejednorodność i różnorodność składu, w tym zawartość chloru prowadząca do emitowania w procesie spalania chlorowodoru, dioksyn i furanów [8, 9].

Problemy wynikające z procesu spalania biomasy spowodowały, że w ostatnim czasie współspalanie biomasy z paliwami kopalnymi zyskało na znaczeniu. Było to także spowodowane wsparciem państwa w postaci świadectw pochodzenia dla biomasy. Proces ten był i jest przedmiotem badań i analiz prowadzonych w elektrowniach, elektrociepłowniach oraz wielu ośrodkach naukowo-badawczych [10-13]. Na podstawie prowadzonych dotychczas badań eksperymentalnych [14] stwierdzono, że dodatek biomasy do węgla zdecydowanie zmienia kinetykę i mechanizm spalania. Nowa Ustawa o OZE ogranicze jednak pomoc finansową dla współspalania. Ustawa ta bowiem wprowadza współczynnik korekcyjny dla świadectw pochodzenia energii elektrycznej wytworzonej w instalacjach spalania wielopaliwowego. Fakty te powodują, że poszukuje się wciąż nowatorskich rozwiązań wykorzystujących biomasę w procesach termicznych. Przykładem takiego rozwiązania jest technologia pirolizy.

Piroliza jest termiczną konwersją substancji organicznej bez dostępu tlenu [15]. Jako produkt końcowy uzyskuje się węgiel - koksik, frakcję ciekłą oraz mieszaninę palnych gazów [16]. Piroliza jest procesem prowadzonym przy niższej temperaturze w porównaniu ze spalaniem (i współspalaniem) [17], co ogranicza powstawanie toksycznych substancji w gazach odlotowych i nie powoduje konieczności budowy skomplikowanego systemu oczyszczania gazów. Spośród innych najważniejszych zalet pirolizy w porównaniu ze spalaniem wymienić należy: (1) brak zjawiska porywania cząstek ciała stałego do fazy gazowej, przez co zmniejsza się potrzeba instalowania urządzeń odpylających do kontroli emisji; (2) W niższej temperaturze zmniejszona jest korozja, co ogranicza koszty utrzymania instalacji; (3) Dzięki niskiej temperaturze możliwe jest odzyskanie ze stałych produktów popirolitycznych surowców wtórnych, szczególnie metali nieżelaznych; (4) Ze względu na endotermiczny charakter piroliza jest procesem dającym się łatwiej kontrolować niż spalanie; (5) Duża elastyczność, jeśli chodzi o skład paliwa poddawanego pirolizie; (6) Produkty pirolizy można magazynować i stosować w późniejszym terminie do celów energetycznych, np. koksik może być użyty jako nośnik energii [18].

Mimo swoich zalet, piroliza wymaga dostarczenia odpowiedniej porcji energii w krótkim czasie, by osiągnąć wymaganą temperaturę (ok. 300-600°C) [19]. Ta porcja energii jest najczęściej dostarczana ze źródeł nieodnawialnych. Alternatywą jest wykorzystanie energii słońca do podgrzania reaktora. Proces pirolizy solarnej jest endotermicznym procesem konwersji materiału organicznego w atmosferze obojętnej, w której wymagane ciepło jest dostarczane poprzez skoncentrowane promieniowanie słoneczne. Promieniowanie dochodzące ze słońca jest skupiane i kierowane do reaktora poprzez układ optyczny.

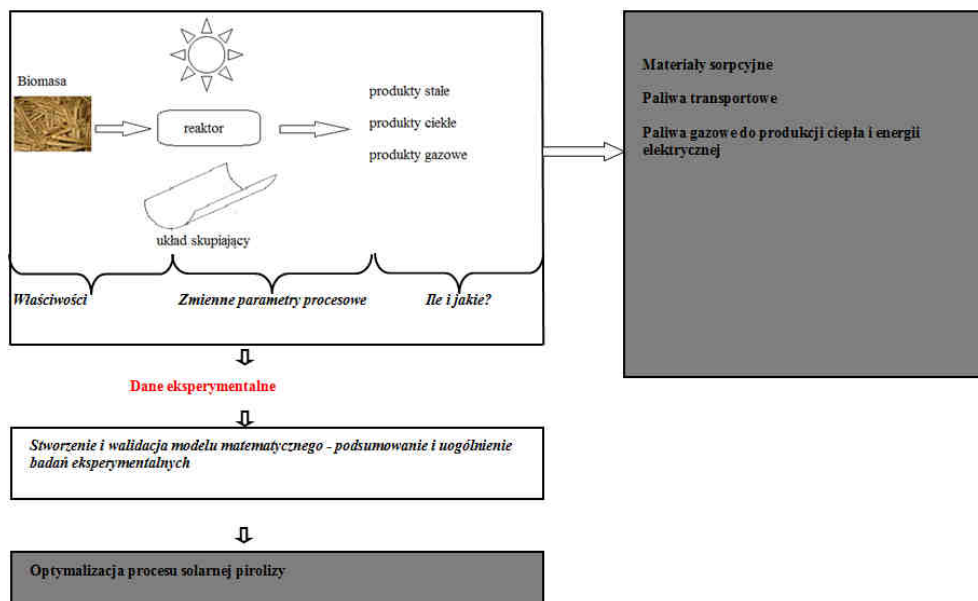
Proces pirolizy solarnej oferuje możliwość pośredniego magazynowania energii słońca w produktach stałych, ciekłych i gazowych. Do dziś funkcjonuje niewielka liczba opatentowanych rozwiązań służących do pirolizy solarnej biomasy. Większość rozwiązań jest skoncentrowana na produkcji wodoru i tlenku węgla. Systemy te najczęściej bazują na rozwiązaniach hybrydowych łączących układ solarny z mikrofalowym nagrzewaniem wsadu [20-22]. Tylko McAllister [23] oraz Storey ze współpracownikami [24] zastosowali skoncentrowane promieniowanie słońca jako jedyne źródło ciepła do procesu pirolizy. Analizując prace badawcze z tego zakresu, należy podkreślić zróżnicowanie wykorzystywanych do procesu paliw: węgla [25], biomasy i odpadów oraz - najczęściej - czystej celulozy [20]. Analizując dotychczasowy stan wiedzy, można jednoznacznie uznać, iż nie prowadzono kompleksowych zintegrowanych badań obejmujących podstawowe badania eksperymentalno-obliczeniowe procesu pirolizy solarnej biomasy odpadowej (leśnej, agrarnej i komunalnej). Co prawda badania numeryczne procesu pirolizy są obecne w doniesieniach literaturowych od kilku lat [26-28], niemniej jednak wg najlepszej wiedzy projektodawców nie obejmują one swym zakresem procesu dostarczania ciepła bezpośrednio (poprzez skoncentrowanie systemem optyki) od słońca.

W pracy przedstawiono koncepcję autorskiego rozwiązania instalacji do pirolizy słonecznej.

Proponowane rozwiązanie

Na rysunku 1 pokazano ideę proponowanego rozwiązania. Głównym elementem instalacji jest transparentny, rurowy reaktor oraz symulator słońca w postaci układu lamp ksenonowych z cylindryczno-rurowym układem skupiającym. Włączanie kolejnych lamp ksenonowych będzie symulowało zwiększanie mocy promieniowania. Układ wyposażony będzie w system poboru, analizy i oczyszczania produktów poprocesowych (stałych - koksiku; ciekłych - biooleju oraz gazowych - gazu pirolitycznego) oraz system pomiaru i rejestracji podstawowych parametrów procesowych, jak moc promieniowania, temperatura i ciśnienie procesu pirolizy czy też strumień objętościowy przepływającego gazu inertnego.

Koncentracja promieniowania słonecznego może odbywać się w różny sposób. Podstawowe systemy optyczne używane do koncentracji (skupienia) promieniowania słonecznego wykorzystują klasyczne soczewki, soczewki Fresnela, zwierciadła płaskie i wklęsłe - paraboliczne, zwierciadła wklęsłe liniowe, liniowe soczewki Fresnela oraz koncentratory luminescencyjne. Na rysunku 2 przedstawiono podstawowe typy układów do skupienia promieniowania.



Rys. 1. Schemat ideowy instalacji do pirolizy słonecznej

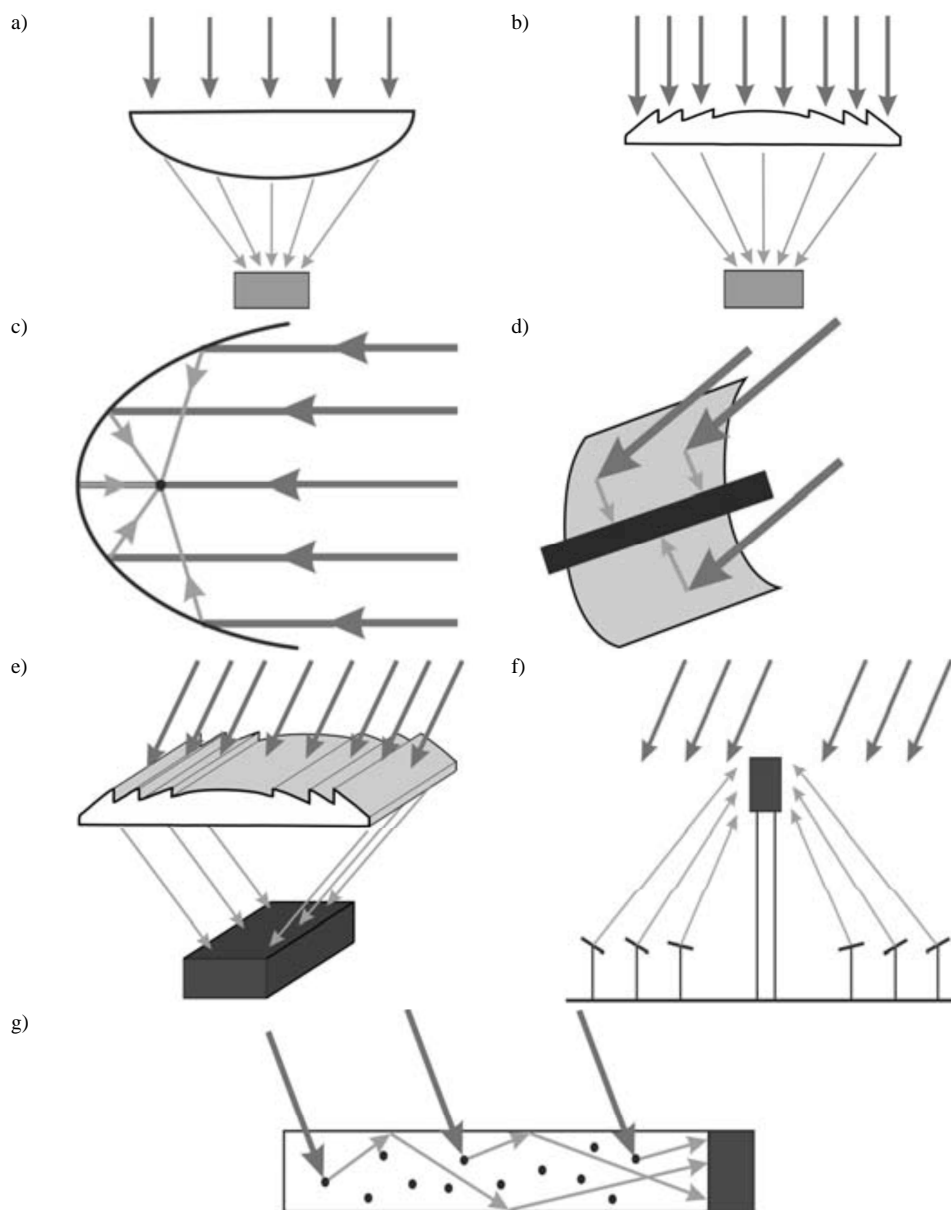
Fig. 1. Idea scheme of the solar pyrolysis process

W zaprezentowanej propozycji planowane jest użycie zwierciadła wklęsłego-liniowego, gdyż takie rozwiązanie pozwoli na osiągnięcie temperatury wymaganej dla procesu pirolizy.

Proponowany układ będzie stanowił podstawowy element większego układu umożliwiającego kompleksowe badania procesu słonecznej pirolizy. Stanowisko umożliwi zbadanie wpływu czasu nasłonecznienia, mocy nasłonecznienia oraz podstawowych parametrów biomasy (m.in. wilgotność, ciepło spalania) na stopień konwersji stałego materiału organicznego. Ponadto możliwy będzie do określenia zestaw optymalnych warunków procesowych, przy których uzysk danego produktu procesowego (ciekły, stały i gazowy) osiąga wartość największą. Dodatkowo układ zostanie sprzęgnięty w układ pozwalający na analizę właściwości fizyczno-chemicznych uzyskanych produktów poprocesowych. Informacje te umożliwią określenie transportu i przemian substancji organicznych i nieorganicznych podczas pirolizy solarnej biomasy.

Proponowana instalacja będzie służyła do walidacji stworzonego modelu matematycznego, co będzie stanowiło podsumowanie i uogólnienie badań eksperymentalnych. Stworzony model matematyczny będzie obejmował następujące zjawiska i zagadnienia:

- przepływ płynu przez ośrodek porowaty i interakcje mechaniczne pomiędzy ośrodkami, przy czym ośrodek porowaty będzie traktowany jako nasycony płynem, czyli obie fazy będą się wzajemnie przenikać,



Rys. 2. Podstawowe metody koncentracji promieniowania słonecznego; a) klasyczna soczewka, b) soczewka Fresnela, c) zwierciadło paraboliczne, d) zwierciadło wklęsłe-liniowe, e) liniowa soczewka Fresnela, f) system zwierciadeł skupiających promieniowanie na wieży oraz g) koncentratory luminescencyjne [29]

Fig. 2. Basic methods of concentration of solar radiation; a) conventional lens, b) Fresnel lens, c) parabolic mirror, d) parabolic-trough, e) a linear Fresnel lens, f) a system of mirrors that focus the radiation on the tower and g) the luminescent concentrators [29]

- przepływ ciepła na drodze przewodzenia, konwekcji i promieniowania, przy czym zweryfikowane zostanie założenie dotyczące równowagi termicznej pomiędzy ośrodkami,
- turbulencja w ośrodku porowatym,
- transport wilgoci w ośrodku porowatym,
- heterogeniczne reakcje chemiczne, takie jak odgazowanie i spalanie koksiku, przyjęty zostanie następujący skład fazy gazowej: CH_4 , C_2H_6 , H_2 , H_2O , CO , CO_2 , smoła. Uwzględnione zostaną efekty energetyczne tych reakcji w równaniu zachowania energii.

Opisywany model matematyczny zostanie zaimplementowany na platformie komercyjnego oprogramowania numerycznej mechaniki płynów ANSYS FLUENT. W tym celu wykorzystane zostaną tzw. funkcje użytkownika (ang. User Defined Functions - UDS) rozszerzające możliwości oprogramowania oraz pozwalające na uzupełnianie i modyfikowanie równań zachowania masy, energii i pędu, a także wprowadzanie własnych równań. W ten sposób zostaną uwzględnione w równaniach człony odpowiedzialne za wymianę pędu i ciepła pomiędzy gazami a biomasą (która będzie zamodelowana jako ośrodek porowaty), generację ciepła związaną z reakcjami chemicznymi, czy zdefiniowane zostaną dodatkowe równania opisujące transport składników fazy stałej, np. dyfuzji wilgoci w ośrodku porowatym. Wykonawcy wniosku mają wieloletnie doświadczenie zarówno w użytkowaniu oprogramowania ANSYS FLUENT, jak i w programowaniu z wykorzystaniem techniki funkcji użytkownika. W analizowanym problemie szczególnie istotne będzie prawidłowe zamodelowanie wymiany ciepła na drodze promieniowania. Zjawisko to zostanie opisane za pomocą modelu DO (Discrete Ordinate). Model ten pozwala zamodelować promieniowanie zarówno w przezroczystym medium, jak i w ośrodku uczestniczącym w promieniowaniu (emitującym i absorbującym), pozwala również zamodelować powierzchnie dyfuzyjne oraz lustrzane. Pomimo nieco mniejszej dokładności od metody Monte Carlo, model DO pozwala na osiągnięcie zadowalających wyników w znacznie krótszym czasie niż metoda Monte Carlo.

Wnioski

Wykorzystanie biomasy w Polsce powinno być oparte na lokalnie dostępnych surowcach. Idea ta jest zgodna z postulowanymi kierunkami rozwoju energetyki rozproszonej oraz wzrostu udziału produkowanej energii elektrycznej i ciepła w oparciu o odnawialne źródła energii.

Najpopularniejsze termiczne metody przerobcze tych materiałów w Polsce to spalanie i współspalanie, jednakże stosowanie tych procesów stwarza wiele problemów technicznych oraz napotyka na ograniczenia formalnoprawne. Powoduje to, że poszukuje się wciąż nowatorskich rozwiązań wykorzystujących biomasę w procesach termicznych. Przykładem takiego rozwiązania jest technologia pirolizy wykorzystująca energię słońca do etapu inicjacji (i podtrzymywania) procesu. Zaproponowane rozwiązanie łączy metody eksperymentalne z modelowaniem matematycznym. Takie zespolenie pozwoli na otrzymanie uwiarygodnionego modelu matematycznego będącego syntezą przeprowadzonych prac eksperymentalnych. Model taki będzie doskonałym narzędziem pozwalającym na symulację i optymalizację procesu solarnej pirolizy, co może być

odpowiedzią na jedne z najistotniejszych problemów cywilizacyjnych w kontekście konieczności produkcji energii ze źródeł odnawialnych, spowodowanej z jednej strony kończącymi się zasobami paliw kopalnych, a z drugiej - uciążliwością ekologiczną tych paliw.

Literatura

- [1] Król D. Biomasa i paliwa formowane z odpadów w instalacjach niskoemisyjnego spalania. Gliwice: Wyd Politechniki Śląskiej; 2013.
- [2] Kruczek S, Głąbik R. Biopaliwa płynne i gazowe. Materiały Konf. Alternatywne i odnawialne źródła energii Nowoczesne technologie. Karczowiska, październik 2006.
- [3] Borycka B. Ekologiczne aspekty współspalania biomasy z odpadów owocowo-warzywnych z węglem, Energetyka i Ekologia. 2009. http://elektroenergetyka.pl/upload/file/2009/6/elektroenergetyka_nr_09_06_e1.pdf.
- [4] Borycka B. Walory ekologiczne spalania biomasy z odpadów owocowo-warzywnych. Energetyka i Ekologia. 2009. http://www.malopolska-oze.pl/publicystyka/biomasa/walory_ekologiczne_spalania_biomasy_z_odpadow_owocowo-warzywnych_d5595_pol.html.
- [5] Refuse derived fuel, current practice and perspectives - Final Report, European Commission - Directorate General Environment 2003. <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/rdf.pdf>.
- [6] Dyrektywa 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych, zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE. <http://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/28/oj>.
- [7] Werle S. Waste Manage Res. 2014;32:954-960. DOI: 10.1177/0734242X14535654.
- [8] Werther J, Saenger M, Hartge EU, Ogada T, Siagi Z. Prog Energ Combust. 2000;26:1-27.
- [9] Balatinez JJ. The potential of intensification in biomass utilization. W: Cote WA, redaktor. Biomass utilization. London: Plenum Press; 1983.
- [10] Ściążko M, Zuwała J, Pronobis M, redaktorzy. Współspalanie biomasy i paliw alternatywnych w energetyce. Zabrze-Gliwice: Wydawnictwo Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla i Politechniki Śląskiej; 2007.
- [11] Kobyłecki R, Bis Z. Analiza możliwości współspalania paliw alternatywnych w kotłach fluidalnych. IX Konferencja Kotłowa nt. Aktualne problemy budowy i eksploatacji kotłów. Prace Naukowe Politechniki Śląskiej. 2002;2(10):85-107.
- [12] Kruczek S, Głąbik R, Mierzyński J. Technologiczne aspekty zastosowania paliw biomasowych w technice kotłowej. IX Konferencja Kotłowa nt. Aktualne problemy budowy i eksploatacji kotłów. Prace Naukowe Politechniki Śląskiej. 2002;2(10):201-217.
- [13] Wilk R, Sarnowski T. Archiwum Spalania. 2009;9(3-4):197-211. http://archspal.itc.pw.edu.pl/downloads/wspolspalanie_wegla_z_biomasa-s.pdf.
- [14] Golec T. Współspalanie biomasy w kotłach energetycznych. Energetyka. 2004;7-8. paleko.com.pl/pliki/kotly/12k.pdf.
- [15] Rutkowski P, Kubacki A. Energ Convers Manage. 2006;47:716-731. DOI: 10.1016/j.enconman.2005.05.017.
- [16] Yaman S. Energ Convers Manage. 2004;45:651-671. DOI: 10.1016/S0196-8904(03)00177-8.
- [17] Basu P. Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory. Elsevier. 2010. <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780123749888>.
- [18] Zeng K, Minh DP, Gauthier D, Weiss-Hortala E, Nzihou A, Flamant G. Biores Technol. 2015;182:114-119. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.01.112.
- [19] Morales S, Miranda R, Bustos D, Cazares T, Tran H. J Anal Appl Pyrol. 2014;109:65-78. DOI: 10.1016/j.jaap.2014.07.012
- [20] Imazaki K. Biomass conversion apparatus. Japanese Patent JP 2010030870 (2010).
- [21] Ugolin N. Method using solar energy, microwaves and plasmas to produce a liquid fuel and hydrogen from biomass or fossil coal. US Patent US 8388706 (2010).
- [22] Limon-Vazquez N, Chavez-Lara F. Collector and systems for generating steam from the use of solar energy. Mexican Patent MX 2010012078 (2012).
- [23] Mcalister RE. Carbon recycling and reinvestment using thermochemical regeneration. European Patent EP 2534228(2012).
- [24] Storey BL, Monceaux JP. Extracting energy products from biomass using solar energy. British Patent GB 2458529 (2009).

- [25] Warzel FM. Apparatus for solar retorting of oils shale. US Patent 4588478 (1986). <http://www.osti.gov/scitech/biblio/5596563>.
- [26] Peters B. Fuel. 2011;90:2301-2314. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.02.003.
- [27] Koufopoulos CA, Papayannakos N, Lucchesi Maschio GA. Can J Chem Eng. 1991;69:907-915.
- [28] Sadhukhan AK, Gupta P, Saha RK. Bioresour Technol. 2009;100:3134-3139. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.01.007.
- [29] Khamooshi M, Salati H, Egelioglu F, Faghiri AH, Tarabishi J, Babadi S. Inter J Photoener. 2014;17. DOI: 10.1155/2014/958521.

USAGE OF THE CONCENTRATED SOLAR RADIATION IN THE BIOMASS PYROLYSIS PROCESS

Institute of Thermal Technology, Silesian University of Technology, Gliwice

Abstract: Thermal methods of the waste biomass utilization are gaining importance for many years. Nevertheless, there are a number of restrictions related to the production of biomass, in particular legal solutions concerning the environmental protection and the principles of biodiversity crops. Therefore, for energy purposes locally available waste products from agriculture, agricultural - food industry, spatial and other biodegradable waste, like the sludge should be used. Nevertheless, these processes are quite problematic taken into consideration technological point of view. Moreover, in case of the Polish market the new Act of the renewable energy sources should be also emphasized. Based on this document, co-financial assistance of the co-combustion installation will be limited. All presented facts cause that new pioneer and innovative thermal solutions for biomass conversion are needed. An example of such technology is pyrolysis. Pyrolysis is the thermal conversion process of organic matter (biomass) in the absence of oxygen to form a liquid, solid and gaseous product. The paper presents an analysis of selected solutions using concentrated solar radiation in the process of waste biomass pyrolysis. Against this background, a concept of author concept of the pyrolysis solar installations was presented.

Keywords: pyrolysis, biomass, solar energy, experimental investigation