

Uwarunkowania technologiczne budowy układów energetycznych zintegrowanych z termicznym zgazowaniem biomasy¹⁾

Ostatnie lata rozwoju energetyki krajowej to okres intensywnego wzrostu zainteresowania odnawialnymi źródłami energii. Liczne analizy pokazują, że najważniejszym źródłem energii odnawialnej w Polsce jest biomasa. W najbliższych latach spodziewany jest znaczny wzrost jej udziału w krajowej strukturze zużycia paliw pierwotnych.

Biomasa to wszelkie substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego o niskim stopniu uwęglenia i dużej zawartości lotnych związków organicznych, małej zawartości popiołu i stosunkowo niskiej wartości opałowej w odniesieniu do jednostki objętości. Do biomasy zalicza się więc drewno i jego odpady, rośliny energetyczne uprawiane specjalnie i rosnące dziko, słomę, odpady z produkcji zwierzęcej, gospodarki komunalnej oraz niektórych procesów produkcyjnych (np. przemysł spożywczy, papierniczy).

Potencjał energetyczny biomasy w Polsce jest szacowany na ok. 407,5 PJ w skali roku, na co składa się biomasa pozyskiwana w [8]:

- rolnictwie – ok. 195 PJ,
- w leśnictwie – ok. 101 PJ,

¹⁾ Praca wykonana w ramach projektu badawczego nr 4 T10B 022 25 finansowanego ze środków Komitetu Badań Naukowych. Autorzy wyrażają podziękowania za dofinansowanie badań.

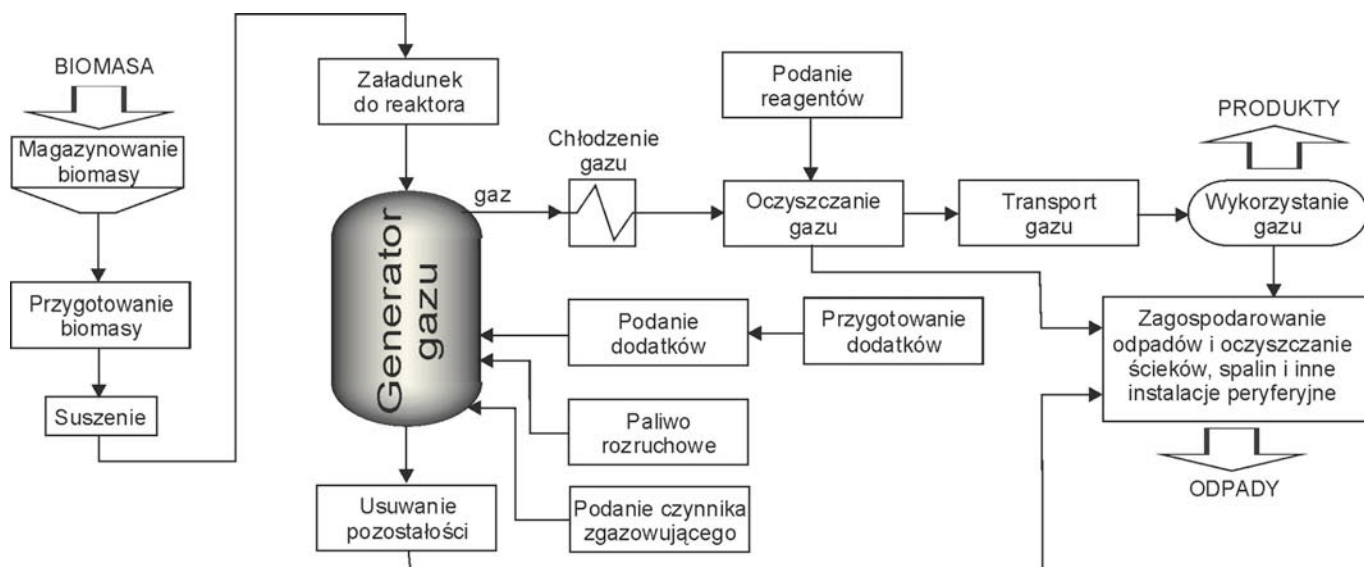
- w sadownictwie – ok. 57,6 PJ,
- odpady z przemysłu drzewnego – ok. 53,9 PJ.

W stosowanych obecnie w kraju technologiach wykorzystania biomasy do celów energetycznych jest ona najczęściej bezpośrednio spalana w różnego rodzaju kotłach. Do innych technologii, które mogą odegrać znaczącą rolę w zwiększeniu znaczenia biomasy w energetyce, zaliczyć można produkcję biogazów poprzez fermentację metanową w biogazowniach oraz zgazowanie termiczne. W tych procesach biomasa stała podlega konwersji do postaci gazu palnego, który może być stosowany w różnego rodzaju urządzeniach energetycznych (silniki tłokowe, turbiny, ogniwa paliwowe, kotły, suszarnie itd.).

W celu szerokiego rozwoju nowych (w kraju) technologii wykorzystania biomasy konieczne jest spełnienie szeregu warunków, z których najważniejsze to odpowiedni poziom techniczny instalacji oraz efektywność ekonomiczna inwestycji.

Ważnym aspektem w planowaniu rozwoju technologii pozyskiwania paliw gazowych z biomasy jest określenie rozwiązań możliwych do realizacji w warunkach krajowego sektora rolnoleśnego.

Problematyka budowy i eksploatacji układów energetycznych, zintegrowanych ze zgazowaniem biomasy jest bardzo złożona.



Rys. 1. Schemat układu energetycznego zintegrowanego ze zgasowaniem biomasy

Na etapie przygotowania projektu obejmuje ona takie zagadnienia jak:

- wybór rodzaju wsadu oraz analiza możliwości jego podaży w czasie,
- wybór technologii zgasowania, parametrów procesu i etapów i parametrów procesu oczyszczania gazu,
- określenie wymagań dotyczących jakości oraz rodzaju biomasy,
- określenie sposobu podawania wsadu do generatora gazu,
- wybór technologii oczyszczania gazu,
- rozwiązanie problemów z zagospodarowaniem odpadów poprocesowych,
- rozwiązanie problemów oczyszczania ścieków poprocesowych,
- wybór technologii wykorzystania gazu (turbina gazowa, silnik, spalanie w kotłach) w danych warunkach zmienności obciążenia cieplnego elektrociepłowni,
- dobór mocy elektrycznej i cieplnej układu,
- określenie efektów energetycznych, ekologicznych, ekonomicznych.

Schemat typowego układu pozyskiwania i wykorzystania paliwa gazowego z biomasy w procesie jej zgasowania przedstawiono na rysunku 1. Kluczowym elementem układu jest generator gazu, od którego zależy rodzaj, ilość i parametry pozostałych elementów.

W niniejszym artykule przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z pozyskiwaniem paliw gazowych w procesach termicznego zgasowania biomasy.

Technologie termicznego zgasowania biomasy

Zgasowaniem termicznym nazywa się proces cieplny, w którym substancja stała zawierająca węgiel i wodór jest poddawana konwersji do postaci gazu palnego.

W skład gazu wchodzi gazowe składniki palne: tlenek węgla, wodór, metan oraz gazy niepalne: dwutlenek węgla, para wodna oraz azot. Wytwarzany gaz zawiera również węglowodory wyższych rzędów, które stanowią tzw. substancje smoliste, a także nieznaczną ilość cząstek stałych. Składniki te nie są pożądane, a ich usuwanie z gazu stanowi jeden z głównych problemów technologii zgasowania termicznego.

Jak pokazuje doświadczenie, najczęściej zgasowaniu poddawane są następujące rodzaje substancji: drewno opałowe, drewno odpadowe z procesów technologicznych, drewno odpadowe z zużytych produktów drewnianych, słoma, odpady z produkcji rolnej i leśnej, odpady z upraw roślinnych, odpady z hodowli zwierząt, odpady komunalne, paliwa z odpadów (pelety, RDF), osady ściekowe i osady z produkcji papierniczej, ścinka z parków, pasów przydrożnych i innych, uprawy energetyczne.

W skład procesu technologicznego termicznego zgasowania biomasy wchodzi następujące etapy: suszenie biomasy, piroliza (odgazowanie), spalanie (utlenianie części produktów pirolizy w celu wytworzenia ciepła dla procesu) i różna reakcje endo- oraz egzotermiczne zachodzące w fazie gazowej w obecności węgla związanego w fazie stałej.

Zgasowanie prowadzone jest zwykle w pojedynczym reaktorze. Obecnie stosowanych znanych jest kilka technologii reaktorów. Różnią się one między sobą przebiegiem i parametrami procesu, jak również efektywnością energetyczną, składem, zawartością zanieczyszczeń i wymaganiami co do dalszej obróbki technologicznej wytworzonego paliwa gazowego.

Technologie zgasowania paliw stałych rozwijane są od dziesięcioleci, głównie w odniesieniu do paliw węglowych. Na świecie pracuje obecnie kilkaset reaktorów zgasowania węgla, głównie w technologiach Shell, Texaco, Lurgi. Technologie te nie nadają się jednak do bezpośredniego zgasowania biomasy.

Główne technologie zgasowania węgla wykorzystują reaktory typu strumieniowego (Entrained Flow). Wymagają one przygotowanego pyłu węglowego o granulacji około 0,1 mm. Pył podawany jest palnikami pyłowymi i w pierwszej fazie spalany.

Właściwości fizykochemiczne biomasy (jak np. większy udział substancji lotnych, wilgoci i popiołu) powodują, że zgazowanie biomasy w tego typu reaktorach jest trudne. Główne problemy występują z przygotowaniem odpowiednio drobnej frakcji wsadu [14].

Ze względu na znacznie większą niż w przypadku węgla zawartość substancji lotnych, w procesie zgazowania biomasy znacznie ważniejszą rolę odgrywa piroliza. Ponadto procesy fizykochemiczne zachodzące w reaktorze zgazowującym biomasę charakteryzują się większymi szybkościami. Zwykle niższa jest również temperatura procesu.

Biomasa o dużym udziale związków alkalicznych, jak trawy, słomy i inne odpady z produkcji rolnej może powodować poważne problemy korozyjne i erozyjne, jak również pojawianie się depozytów na powierzchniach kanałów i wymienników ciepła. Problemy powoduje tu również niższa niż w przypadku innych paliw temperatura mięknięcia popiołu.

Z wymienionych powodów technologie zgazowania biomasy rozwijają się obecnie niezależną drogą w stosunku do technologii zgazowania węgla. Występuje tu duża różnorodność rozwiązań konstrukcyjnych reaktorów i układów. Aktualnie na świecie pracuje ponad 100 instalacji zgazowania biomasy. Zastosowane tam technologie są na różnym etapie rozwoju.

Na liście producentów zamieszczonej w serwisie www.gasifiers.org znajduje się obecnie ponad 60 instytucji. Niektóre z nich oferują już instalacje komercyjne. Większość technologii zgazowania biomasy, a w szczególności odpadów znajduje się obecnie w fazie badań i rozwoju. Wiele z nich osiągnęło na razie poziom instalacji demonstracyjnych.

Zestawione, skrócone charakterystyki podstawowych, stosowanych obecnie technologii zgazowania biomasy podano w literaturze [2–4, 7–9, 12–13, 15].

I. Reaktory ze złożem stałym (cechy wspólne):

- prosta konstrukcja,
- wykonywane wyłącznie jako reaktory atmosferyczne (niewielka nadwyżka ciśnienia wymuszana jest jedynie wentylatorem podmuchowym powietrza),
- małe spadki ciśnienia gazu w złożu,
- czas przebywania wsadu (tzw. residence time) od kilku godzin nawet do kilku dni,
- możliwość stosowania wsadu o znacznej zawartości popiołu,
- nierównomierny rozkład temperatury w reaktorze,
- możliwość pracy w zakresie 20–120% mocy znamionowej
- możliwe jedynie powolne zmiany rodzaju wsadu poddawane zgazowaniu ze względu na dużą zawartość wsadu w reaktorze
- trudne (niemal niemożliwe) skalowanie dla uzyskiwania różnych mocy znamionowych,
- niska wydajność jednostkowa (w odniesieniu do objętości reaktora),
- wysokie współczynniki konwersji węgla pierwiastkowego,
- mała ilość popiołu,
- długi czas rozruchu ze stanu zimnego,
- możliwość występowania kanałów dla przepływu fazy gazowej co pogarsza warunki wymiany ciepła i masy,
- duża liczba producentów reaktorów lecz mała liczba niezawodnych konstrukcji komercyjnych.

Reaktory ze złożem stałym dolnociągowe (downdraught) współprądowe:

- faza stała i faza gazowa przemieszczają się w tym samym kierunku, w dół reaktora,
- najniższe moce w porównaniu z innymi technologiami zgazowania,
- nadaje się jedynie do wybranych rodzajów i sortymentu wsadu,
- wymagany równomierny sortyment wsadu w złożu,
- występowanie charakterystycznego przewężenia konstrukcyjnego średnicy wewnętrznej w celu wymuszenia przejścia gazu przez strefę wysokiej temperatury (zabieg zmniejszający zawartość substancji smolistych),
- wykazuje skłonności do szlakowania,
- długi czas procesu zgazowania,
- wymagana niska zawartość wilgoci w biomacie (ograniczone suszenie wewnętrzne),
- stosunkowo czysty gaz (niska zawartość substancji smolistych),
- wysoka temperatura gazu na wyjściu z reaktora.

Reaktory ze złożem stałym górnociągowe (updraught) przeciwprądowe:

- faza stała przesuwana się w dół reaktora, faza gazowa w przeciwprądzie w górę,
- moce reaktorów pomiędzy dolnociągowymi a fluidalnymi,
- możliwość stosowania wsadu o grubszym sortymencie,
- wewnętrzne suszenie wsadu; możliwość stosowania wsadu o dużym udziale wilgoci,
- zanieczyszczony gaz z dużą zawartością substancji smolistych,
- stosunkowo niska temperatura gazu na wyjściu z generatora,
- wysoka sprawność.

Reaktor ze złożem stałym dolnociągowe z otwartym rdzeniem (open core):

- odmiana reaktora dolnociągowego,
- wsad i powietrze są podawane razem od góry reaktora,
- stała średnica wewnętrzna na całej długości reaktora (brak przewężenia konstrukcyjnego),
- stosowane do zgazowania wsadu o małej gęstości nasypowej,
- temperatura gazu z reaktora pomiędzy typową konstrukcją dolnociągową a górnociągową.

II. Reaktory ze złożem fluidalnym

- stosowane jedynie w zakresie dużych mocy (10 – 100 MW),
- łatwy i szybki rozruch i zatrzymanie,
- większe spadki ciśnienia gazu niż w przypadku złoża stałego,
- możliwość pracy w zakresie obciążeń 50–120% mocy znamionowej,
- mała ilość wsadu w reaktorze, co zapewnia dużą elastyczność zmian rodzaju wsadu,
- bardzo dobre warunki wymiany ciepła i masy dzięki wymieszaniu fazy stałej, ciekłej i gazowej,
- wyrównana temperatura w reaktorze,
- stosunkowo proste skalowanie w celu uzyskania różnych mocy znamionowych,

- możliwość stosowania katalizatorów w złożu w celu przyspieszenia reakcji,
- możliwość kontroli temperatury procesu,
- większa tolerancja na zmienną jakość (rodzaj) wsadu niż w przypadku złóż stałych,
- znacznie większa tolerancja na nierównomierną wielkość cząstek wsadu,
- wielość cząstek wsadu ograniczona koniecznością zapewnienia fluidyzacji złoża,
- większa powierzchnia kontaktu fazy gazowej i stałej,
- wysoka wydajność jednostkowa (w odniesieniu do objętości reaktora),
- wyższe straty węgla w popiele (niższe współczynniki konwersji wsadu),
- stosunkowo duża zawartość pyłów unoszonych w gazie.

Reaktory fluidalne dzielą się na reaktory ze złożem:

- a) stacjonarnym – zakres mocy niskich i średnich (do 25 MW),
- b) cyrkulującym – zakres mocy średnich i dużych (dają ponadto mniejszą zawartość substancji smolistych w gazie).

Właściwie jest to jedyny typ reaktorów, dla których jest dostępna szeroka oferta sprawdzonych komercyjnie technologii.

III. Reaktory strumieniowe (entrained bed):

- cząstki wsadu są unoszone przez strumień czynnika zgazowującego w kierunku wylotu gazu; wszystkie reakcje zachodzą w strumieniu unoszonych substancji,
- technologia najbardziej rozpowszechniona w zgazowaniu węgla, lecz stosunkowo rzadko stosowana do zgazowania biomasy,
- zwykle w reaktorach tego typu prowadzone jest wspólne zgazowanie biomasy i węgla,
- wysokie temperatury procesu zapewniające dużą czystość gazu, lecz mniejsze wartości opałowe (1300 – 1500°C),
- z uwagi na wysoką temperaturę pracy reaktora następuje rozkład termiczny substancji smolistych,
- wysokie ciśnienie robocze (zwykle 2 do 5 MPa),
- wymagają znacznego rozdrobnienia biomasy,
- krótki czas przebywania cząstki wsadu w reaktorze (ok. 1 s),
- skomplikowane układy przygotowania i podawania biomasy,
- jedynie duże reaktory (powyżej 10 ton wsadu/h),
- znikoma zawartość substancji smolistych w gazie,
- wykazują tendencje do szlakowania,
- wysoki stopień konwersji biomasy,
- stosunkowo mały zakres rodzajów biomasy poddawanej zgazowaniu,
- dzielimy je na dwa typy: zużylujące i niezużylujące,
- zwykle końcowym etapem jest gaszenie gazu i żużla wodą, co wiąże się z dużym jej zużyciem.

IV. Reaktory krzyżowoprądowe:

- faza stała przesuwana się w dół reaktora, a faza gazowa w poziomie (w prądzie krzyżowym),
- stosowane zwykle w małych zakresach mocy, tzn. do 30 kW,
- wielkość ziarna wsadu ograniczona do około 40–80 mm,
- udział popiołu we wsadzie ograniczony do około 6%,
- zwykle stosowane do zgazowania węgla drzewnego,

- gaz silnie zanieczyszczony; zwykle bezpośrednio spalany w kotłach,
- niska sprawność procesu zgazowania (50-70%),
- bardzo mała oferta rynkowa tego typu reaktorów,
- wyłącznie reaktory atmosferyczne,
- wartość opałowa gazu 4–6 MJ/m³,
- zawartość wilgoci we wsadzie nie powinna przekraczać 15–20%.

Spotykane są również inne typy reaktorów, jak np. reaktory dwustrefowe z rozdzielonymi reaktorami pirolizy i zgazowania (np. Viking), z oddzielną pirolizą i zgazowaniem od spalania – dwukomorowy z pośrednim nośnikiem ciepła (np. SilvaGas, FICFB), w cylindrycznych komorach obrotowych z ogrzewaniem zewnętrznym, cyklonowe i inne. Większość z nich reprezentuje stosunkowo nowe rozwiązania technologiczne i jest obecnie w fazie testów w instalacjach pilotowych (nie są jeszcze oferowane komercyjnie). Na rynku oferowane są ciągle głównie typy reaktorów z grup od I do IV.

Przedstawione typy reaktorów można dodatkowo sklasyfikować ze względu na sposób doprowadzenia ciepła do procesu, na ciśnienie procesu oraz na rodzaj czynnika zgazowującego.

Ze względu na sposób doprowadzenia ciepła reaktory dzieli się na:

- a) reaktory autotermiczne (z wytwarzaniem ciepła bezpośrednio w reaktorze):
 - z podawaniem powietrza atmosferycznego,
 - z podawaniem powietrza wzbogaconego w tlen,
 - z podawaniem tlenu technicznego,
 - z podawaniem pary wodnej.
- b) reaktory z pośrednim doprowadzeniem ciepła:
 - z cyrkulującym materiałem inertnym jako nośnik ciepła (piasek, metale),
 - z ogrzewaniem wsadu przez bezpośredni kontakt z gorącą powierzchnią.

Większość technologii z pośrednim doprowadzeniem ciepła wymaga dodatkowego paliwa rozruchowego.

Ze względu na ciśnienie procesu reaktory można podzielić na:

- reaktory atmosferyczne (pracujące przy nieznacznej nadwyżce ciśnienia ponad ciśnienie otoczenia, wymuszanej zwykle przez dmuchawę powietrza)

– reaktory ciśnieniowe (gdzie proces zgazowania jest prowadzony przy znacznie podwyższonym ciśnieniu).

Reaktory ciśnieniowe mają następujące zalety:

- większe moce z jednostki objętości reaktora,
- większe wartości opałowe gazu,
- mniejsze wymiary układów oczyszczania gazu,
- eliminacja sprężarki przed komorą spalania turbiny gazowej (w przypadku spalania w turbinie gazowej).

Do wad technologii ciśnieniowych można zaliczyć:

- problemy z podawaniem biomasy do reaktora,
- problemy z układami oczyszczania gorącego gazu,
- występowanie par metali alkalicznych w gazie,
- niska sprawność w niezbyt wysokich temperaturach,
- wysokie jednostkowe nakłady inwestycyjne w przypadku małych mocy.

Zgazowanie z wykorzystaniem powietrza jako czynnika zgazowującego prowadzi do wytwarzania gazu o stosunkowo niskiej wartości opałowej ($3,5\text{--}7 \text{ MJ/m}_n^3$), z uwagi na dużą zawartość balastu w postaci azotu. Jednak z uwagi na niskie nakłady inwestycyjne i niskie koszty eksploatacji, zgazowanie powietrzne jest obecnie najczęściej stosowaną technologią.

Jako czynniki zgazowujące, poza powietrzem, stosuje się głównie:

- powietrze wzbogacone w tlen,
- parę wodną,
- tlen techniczny,
- dwutlenek węgla.

Zastosowanie wymienionych czynników zgazowujących wymaga instalowania dodatkowych urządzeń peryferyjnych (w których wytwarzany jest czynnik zgazowujący), co podnosi, nawet znacząco, nakłady inwestycyjne i koszty eksploatacji. Stąd rozwiązania tego typu stosuje się w układach największych mocy.

Ograniczenia technologiczne procesów zgazowania biomasy

Jednym z głównych ograniczeń technologicznych stosowania układów energetycznych zintegrowanych ze zgazowaniem biomasy jest zapewnienie ciągłości dostaw paliwa. Biomasa, w stosunku do innych paliw, charakteryzuje się zmiennym składem oraz niską wartością opałową przypadającą na jednostkę objętości, co zwiększa zarówno masę jak i objętość biomasy transportowanej do odbiorcy. Zwykle występują też trudności w zapewnieniu stałych dostaw wsadu o jednolitym składzie, wilgotności i sortymencie w długim okresie (np. 15 lat). Wymagania dotyczące transportu i składowania są tu więc duże w stosunku do innych paliw stałych.

Realizacja projektu elektrociepłowni lub elektrowni zasilanej biomasą wymaga stworzenia rozbudowanej infrastruktury systemu pozyskania, dostaw i przygotowania paliwa. Układy takie nie mogą powstawać w dowolnie wybranych miejscach. Ponadto przy obecnej podaży oraz cenach paliw kopalnych, uwzględniając jednocześnie niższą sprawność energetyczną układów na biomasę, należy stwierdzić, że nie zawsze są one konkurencyjne ekonomicznie.

Jak wynika z licznych źródeł literaturowych, ważnym problemem technicznym, zwykle nie podejmowanym na etapie rozważania możliwości realizacji projektu, jest przygotowanie i podanie wsadu do reaktora. Cechy charakterystyczne biomasy powodują, że postać geometryczna wsadu do reaktora bywa różna, od małych wiórów po całe drzewa. Wymaga to specjalnego projektowania układów zasilania.

Jak pokazuje doświadczenie obecnie najwięcej problemów eksploatacyjnych występuje właśnie w układach zasilania reaktorów.

Najczęstsze usterki układów zasilania to:

- zawisanie wsadu i blokowanie przepływu,
- kondensacja substancji smolistych na śluzach i zaworach,
- zbyt duża podaż wsadu,
- uszkodzenia podajników śrubowych,
- uszkodzenia taśmociągów.

W zależności od sortymentu dostępnego materiału oraz wymagań generatora gazu może okazać się konieczne dodatkowe rozdrobnienie lub brykietowanie wsadu. Często przed wprowadzeniem do generatora biomasa jest wstępnie suszona w suszarni, będącej częścią układu. Odpowiednia wydajność i dyspozycyjność tych etapów procesu technologicznego ma również wpływ na pracę obiektu jako całości.

Podstawowym problemem, występującym w układach zgazowania biomasy są substancje smoliste. Są to węglowodory o masie drobinowej większej od benzenu C_6H_6 ($M > 78 \text{ kg/kmol}$), których temperatura kondensacji jest wyższa niż 150°C .

W pracy [6] przedstawiono blisko 300 węglowodorowych związków chemicznych, które wykryto w gazie (o liczbie atomów węgla w cząsteczce wynoszącej od 6 do 24), które stanowią substancje smoliste o różnych właściwościach. Najważniejsze z nich to: benzen, toluen, styren, ksylen, fenol, krezol, inden, naftalen, metylo-naftalen, dimetylo-naftalen, acetylo-naftalen, fenatren, antracen.

Ilość i skład substancji smolistych zależy od typu reaktora, parametrów procesu (ciśnienie, temperatura, czas), właściwości wsadu (rodzaj, wilgotność, rozdrobnienie wsadu). Najkorzystniejsze warunki do powstawania dużych ilości substancji smolistych występują w reaktorach ze złożem przeciwpłdowym. Średnia zawartość substancji smolistych w tym typie reaktora to 50 g/m^3 (choć zdarzają się takie, gdzie udział ten mieści się w przedziale $2\text{--}10 \text{ mg/m}^3$). Reaktory fluidalne mogą produkować gaz o zawartości substancji smolistych około 10 g/m^3 , a reaktory ze złożem stałym dolnociągowe nawet na poziomie 1 g/m^3 .

Dopuszczalna zawartość substancji smolistych w gazie, w przypadku jego zastosowania do zasilania silnika spalinowego powinna być poniżej 50 mg/m^3 . Niektórzy producenci silników obniżają tę granicę nawet do 30 mg/m^3 . W niektórych instalacjach zastosowane zostały chińskie silniki wolnoobrotowe, przerabiane z konstrukcji morskich, w których producent dopuścił udział substancji smolistych w gazie w przedziale $50\text{--}100 \text{ mg/m}^3$.

W przypadku turbin gazowych substancje smoliste nie stanowią większego zagrożenia dopóki są utrzymywane w fazie gazowej. W większości instalacji wymóg ten jest dotrzymywany, gdyż gorący gaz wprowadzany jest bezpośrednio do komory spalania. Problemem są tu raczej metale alkaliczne, jak sód i potas oraz ich związki. Są one odpowiedzialne za powstawanie depozytów w układzie przepływowym maszyny.

W przypadku reaktorów atmosferycznych, gdzie konieczne jest sprężenie gazu przed turbiną, wymaga się zwykle głębokiego schłodzenia gazu. Rosną tu wymagania odnośnie do czystości gazu, co wynika z konieczności zabezpieczenia sprężarki gazu przed uszkodzeniem (możliwe są ograniczenia na poziomie nawet $0,5 \text{ mg/m}_n^3$).

Inne zanieczyszczenia, jakie powinny zostać usunięte z gazu przed wprowadzeniem do silnika czy turbiny, to: cząstki stałe, związki alkaiczne (głównie potasu i sodu), związki chloru i fluoru (halogenki), amoniak i inne związki azotu, substancje smoliste, związki siarki.

Dostępne obecnie generatory nie zapewniają dotrzymania wymagań odnośnie do czystości produkowanego gazu. W związku z tym, gdy rozważa się zastosowanie gazu w silniku lub turbinie gazowej konieczne jest jego oczyszczenie.

Doświadczenia eksploatacyjne pokazują, że systemy oczyszczania gazu nie pracują bezproblemowo. Nie są one również skuteczne w sposób zapewniający spełnienie ostrych wymagań co do czystości gazu. Jest to szczególnie zauważalne w przypadku instalacji małych mocy, z reaktorami ze złożem stałym.

Wybór technologii zgazowania biomasy

Obecnie w Europie, USA i Kanadzie działa kilkadziesiąt firm oferujących komercyjne technologie zgazowania biomasy, w tym [5]:

- 75% firm oferuje generatory ze złożem stałym dolnociągowe,
- 20% firm oferuje generatory ze złożem fluidalnym,
- 2,5% firm oferuje generatory ze złożem stałym górnociągowe,
- 2,5% firm oferuje inne typy reaktorów.

Jednym z istotnych faktów dotyczących komercyjnych technologii zgazowania jest to, że większość firm oferuje tylko jeden typ reaktora, a niektóre wręcz wyłącznie jedno urządzenie (o określonej mocy). Nieliczne firmy opracowały typoszereg reaktorów. Większość z nich jednak, poza instalacją pilotową, nie wykonała innych obiektów będących w eksploatacji na skalę komercyjną. Tak więc firm posiadających sprawdzone technologie zgazowania biomasy, zweryfikowane przez instalacje komercyjne, jest stosunkowo niewiele.

Analiza kierunków rozwoju technologii zgazowania biomasy pokazuje, że w ostatnich latach zmierza on raczej w kierunku reaktorów ze złożem fluidalnym (stacjonarnym bądź cyrkulacyjnym). Szczególnie tendencja ta jest widoczna w zakresie reaktorów dużych mocy. W przypadku generatorów małej mocy, tzn. do kilkuset kW, dominują reaktory ze złożem stałym. Wynika to z niskich kosztów instalacji.

Planując realizację układu energetycznego zintegrowanego ze zgazowaniem biomasy, należy w pierwszej kolejności ustalić kryteria oceny poszczególnych rozwiązań. Można tu podać co najmniej cztery różne kryteria oceny projektów.

1. Kryterium techniczne, w ramach którego oceniana jest możliwość technicznej realizacji projektu. Ocenie podlegają tu takie elementy, jak:

- możliwość lokalizacji,
- dostępność surowca do zgazowania,
- wymagana powierzchnia zabudowy,
- wymagania co do instalacji peryferyjnych (głównie instalacji oczyszczania gazu, oczyszczania ścieków, zagospodarowania odpadów poprocesowych),
- wymagania w zakresie przygotowania surowca do zgazowania (transport, magazynowanie, sortyment, wilgotność),
- wymagania w zakresie parametrów nośników energii (poziomy napięcia prądu elektrycznego, rodzaj nośnika ciepła, tzn. para lub woda i poziom temperatury),
- możliwość wykorzystania produktów użytecznych (energii elektrycznej i ciepła),
- wymagania serwisowe instalacji zgazowania, instalacji obróbki gazu oraz urządzeń energetycznych,
- możliwa do uzyskania roczna dyspozycyjność urządzeń,
- wymagania w stosunku do mocy urządzeń,

- typ możliwych do zainstalowania urządzeń oraz ich osiągalne parametry techniczne,
- wymagania dotyczące urządzeń rezerwowo-szczytowych,
- długość okresów międzyremontowych dla poszczególnych urządzeń,
- dostępność serwisu,
- wymagania obsługi.

2. Kryterium energetyczne, w ramach którego oceniana jest efektywność energetyczna planowanej instalacji (przede wszystkim sprawność wytwarzania energii elektrycznej, sprawność całkowita oraz moc elektryczna i cieplna systemu); W celu przeprowadzenia takiej oceny konieczna jest znajomość następujących parametrów:

- zmienność podaży biomasy w czasie,
- zmienność w zapotrzebowaniu w czasie na ciepło i energię elektryczną u odbiorców,
- parametry termodynamiczne w poszczególnych punktach układu (ciśnienie, temperatura, skład czynników),
- zapotrzebowanie materiałów pomocniczych i surowców nieenergetycznych,
- energetyczne potrzeby własne systemu.

3. Kryterium ekologiczne, w ramach którego oceniany jest wpływ obiektu na środowisko, a przede wszystkim:

- wielkość i rodzaj emisji zanieczyszczeń w ujęciu lokalnym,
- wpływ na emisję zanieczyszczeń w ujęciu globalnym,
- ilość i skład wytwarzanych ścieków,
- ilość i rodzaj odpadów stałych,
- poziom emisji hałasu.

4. Kryterium ekonomiczne, w ramach którego oceniana jest opłacalność realizacji przedsięwzięcia; w szczególności dokładnej analizie należy poddać:

- ceny zakupu i sprzedaży energii elektrycznej,
- ceny sprzedaży ciepła,
- ceny zakupu biomasy lub koszt jest dostarczenia i przygotowania dla potrzeb procesu,
- koszty materiałów pomocniczych i surowców nieenergetycznych,
- ceny zakupu paliw w przypadku zastosowania rozwiązań alternatywnych (np. gazu ziemnego w przypadku zastosowania gazu ziemnego zamiast gazu generatorowego),
- koszty emisji zanieczyszczeń, odprowadzenia ścieków, składowania odpadów,
- koszt zakupu urządzeń głównych,
- koszt urządzeń peryferyjnych,
- koszty serwisu eksploatacyjnego oraz remontów urządzeń,
- koszty osobowe związane z obsługą bieżącą obiektu,
- koszty projektów, kontraktów, ubezpieczeń i transportu,
- koszty badań wstępnych, pozwoleń, uzgodnień itd.,
- możliwości finansowania przedsięwzięcia oraz koszt pozyskania kapitału.

Ostateczną decyzję o wyborze technologii zgazowania oraz mocy i konfiguracji układu energetycznego można podjąć po złożonej analizie techniczno-ekonomicznej, w ramach której projekt zostanie oceniony z uwzględnieniem wszystkich czterech przedstawionych kryteriów.

Analiza taka ma zawsze charakter indywidualny, głównie ze względu na złożoność układu technologicznego oraz konieczność integracji jego mocy wytwórczych z systemem paliwowym, elektroenergetycznym oraz cieplnym w miejscu instalacji. Niemniej jednak dla pewnych grup zastosowań można wyodrębnić cechy, jakimi powinna się charakteryzować technologia i podjąć próbę sformułowania ogólnych zaleceń co do jej wyboru.

Wybór technologii ze względu na rodzaj i parametry dostępnej biomasy

W zależności od źródła biomasa różni się składem fizycznym, składem pierwiastkowym i chemicznym, udziałem wilgoci, wartością substancji lotnych, zawartością popiołu, sortymentem, gęstością, wartością opałową, podażą (w rozumieniu wartości strumienia masowego, dostępnego w sposób ciągły).

Dokładne określenie parametrów biomasy stanowi podstawę dalszych rozważań na temat możliwości realizacji projektu.

Pozwala ono w pierwszej kolejności na:

- wyeliminowanie technologii, dla których określone parametry biomasy są nieodpowiednie,
- określenie dodatkowych wymagań związanych z obróbką biomasy (selekcjonowanie, suszenie, zrębkowanie, brykietowanie, peletowanie).

Pod względem rodzaju biomasy poddawanej zgazowaniu, technologie podzielić można na:

- technologie zgazowania drewna o sortymencie grubym,
- technologie zgazowania drewna o sortymencie drobnym,
- technologie zgazowania mieszanin drzewnych i stomy,
- technologie zgazowania odpadów komunalnych,
- technologie zgazowania osadów ściekowych.

Doświadczenie pokazuje, że stosunkowo niewiele reaktorów może prowadzić zgazowanie różnych rodzajów biomasy. Większość oferowanych urządzeń przystosowana jest do zgazowania określonego rodzaju i sortymentu wsadu.

W przypadku zgazowania drewna stosunkowo suchego (udział wilgoci do 20%) o sortymencie grubym (do około 10 * 10 * 10 cm) stosowane są reaktory ze złożem stałym, głównie dolnociągowe. W przypadku wzrostu zawartości wilgoci można zastosować wstępne suszenie lub reaktor przeciwprądowy (suszenie wewnętrzne). Ograniczenie mocy dla reaktorów ze złożem stałym to 3 MW dla dolnociągowych i około 20 MW dla górnociągowych.

W przypadku frakcji drobniejszych, szczególnie przy większych mocach, stosowane będą reaktory ze złożami fluidalnymi. Gdy rozdrobnienie wsadu jest jednak zbyt małe (kawałki mniejsze niż około 2x2 x2 cm), wymagane jest wstępne brykietowanie lub peletowanie.

Najdrobniejszy sortyment można poddać zgazowaniu bez peletowania i brykietowania w reaktorze strumieniowym. Jednak doświadczenie pokazuje, że są one stosunkowo rzadko stosowane do zgazowania biomasy pochodzenia roślinnego. Głównie ze względu na nakłady inwestycyjne i moce. Zwykle poddaje się w nich zgazowaniu odpady różnego rodzaju (komunalne i przemysłowe). Doa zgazowania odpadów komunalnych bez ich wstępnej selekcji nadają się wyłącznie reaktory strumieniowe wysokotemperaturowe oraz reaktory specjalne.

Odpady poddawane są w nich zgazowaniu wspólnie z węglem w wysokiej temperaturze (dochodzącej do 1500°C). Udział węgla wynosi zwykle około 40% masy wsadu do reaktora. Wprawdzie prowadzono wiele doświadczeń ze zgazowaniem czystych, nie poddawanych segregacji odpadów komunalnych, jednak kończyły się one niepowodzeniem [16]. Główną przyczyną braku wyników w rozwoju technologii zgazowania odpadów jest skład wsadu, w którym występuje znaczny udział substancji nieorganicznej (szkło, beton, metale, tworzywa sztuczne).

Zgazowanie odpadów komunalnych prowadzone jest również w reaktorach ze złożami fluidalnymi. Wymagana jest tu jednak segregacja wstępna, która zapewnia udział substancji nieorganicznej poniżej 10% masy wsadu. Obecnie zgazowanie odpadów prowadzone jest najczęściej przy wykorzystaniu paliwa RDF (Refuse Derived Fuel) w postaci odpowiednio przygotowanych pelet. W tym przypadku stosowane są wyłącznie reaktory fluidalne (ze względu na rozmiary pelet). Przykładem mogą być tu rozwiązania oferowane przez firmę *Termiska Processor* ze Szwecji.

Wybór technologii ze względu na moc elektryczną i cieplną układu

Moc cieplna i elektryczna układu technologicznego wynikają bezpośrednio z możliwej do uzyskania mocy reaktora (rozumianej jako strumień energii chemicznej gazu). Przy mocach reaktora do około 3 MW znajdują zastosowanie zwykle reaktory ze złożem stałym. Wprawdzie reaktory ze złożem fluidalnym dostępne są już od mocy około 1 MW, jednak jednostkowe nakłady inwestycyjne są tu na tyle duże, że w tym zakresie mocy korzystniej ekonomicznie prezentują się proste konstrukcje reaktorów ze złożem stałym. Zwykle są to reaktory dolnociągowe, gdyż w ich przypadku występuje największa czystość gazu oraz najmniejsze wymagania w zakresie instalacji oczyszczania gazu.

W zakresie mocy 3–20 MW oferowane są zarówno reaktory fluidalne jak i reaktory ze złożem stałym, przeciwprądowe. Te drugie stosowane są wyłącznie w instalacjach, gdzie gaz jest bezpośrednio spalany w palnikach. Wynika to z faktu, że instalacja oczyszczania gazu o tak dużej zdolności przerobowej znacznie zwiększa koszt inwestycji i wpływa na zwiększenie kosztów eksploatacji oraz wymagań obsługi, a także powoduje zmniejszenie dyspozycyjności.

W zakresie dużych mocy oferowane są wyłącznie reaktory fluidalne i reaktory strumieniowe wysokotemperaturowe. Wybór rodzaju reaktora uzależniony jest od rodzaju biomasy. Reaktory ze złożem fluidalnym stacjonarnym są zwykle stosowane dla sortymentów grubszych i biomasy drzewnej. Górna granica mocy reaktorów fluidalnych ze złożem stacjonarnym wynosi około 25 MW. Powyżej tej mocy oferowane są wyłącznie reaktory ze złożem fluidalnym cyrkulacyjnym. Reaktory te spotykane są również w mniejszym zakresie mocy, w przypadku drobniejszego sortymentu, bardziej wilgotnej biomasy oraz innych niż drewno substancji

Reaktory strumieniowe dużych mocy (Lurgi, Texaco, itp.) znajdują zastosowanie wyłącznie w przypadkach zgazowania substancji trudnych do obróbki termicznej, jak np. odpady komunalne i przemysłowe.

Wybór technologii ze względu na wymagane parametry gazu

W zależności od przeznaczenia gazu szczegółowe wymagania odbiorcy mogą dotyczyć ciśnienia, wartości opałowej i czystości gazu.

Gaz o podwyższonym ciśnieniu jest wytwarzany jedynie w generatorach ciśnieniowych ze złożem fluidalnym lub strumieniowych. Ze względów ekonomicznych jednak, technologie ciśnieniowe są stosowane jedynie wtedy, gdy gaz wymagany przez odbiorcę końcowego powinien mieć stosunkowo wysokie ciśnienie.

Reaktory tego typu znajdują więc zastosowanie prawie wyłącznie w przypadku współpracy reaktora z turbiną gazową lub wytwarzania gazu na potrzeby procesów chemicznych. W innych przypadkach nie jest wymagane podnoszenie ciśnienia gazu. Zdecydowana większość reaktorów (wszystkie ze złożami stacjonarnymi) wykonywana jest jako reaktory atmosferyczne.

Górna granica wartości opałowej przy wykorzystaniu powietrza jako czynnika zgazowującego wynosi około 7 MJ/m^3 (typowo około 5 MJ/m^3). Jeżeli gaz ma być wykorzystany w turbinach gazowych, należy mieć na uwadze, że istnieje jedynie niewielka liczba urządzeń z komorami spalania przystosowanymi do gazu o tak niskiej kaloryczności. W tym przypadku podniesienie wartości opałowej umożliwi w pewnym zakresie podniesienie ciśnienia w reaktorze (wzrost udziału CH_4 w gazie) oraz zastosowanie czynnika zgazowującego innego niż powietrze. Gdy nie ma innej możliwości można mieszać gaz generatorowy z gazem wysokokalorycznym (np. ziemnym).

Wartość opałową gazu można zwiększać przez eliminację azotu z czynnika zgazowującego. Gaz o średniej wartości opałowej może być uzyskany dzięki zastosowaniu pary wodnej lub tlenu technicznego. Przy zastosowaniu tlenu technicznego wartości opałowe gazu mieszczą się w przedziale $12\text{--}13 \text{ MJ/m}^3$. Jak do tej pory zgazowanie z zastosowaniem tlenu technicznego jest jednak stosowane jedynie w przemyśle chemicznym do produkcji gazu syntezowego, który ze względów technologicznych może zawierać jedynie ograniczony udział azotu.

Ograniczenia stosowania tej technologii zgazowania wynikają głównie ze stosunkowo wysokich kosztów (cena tlenu technicznego to obecnie około $40\text{--}60 \text{ USD/tonę}$, a typowe zużycie tlenu w obecnie stosowanych technologiach zgazowania to $0,25\text{--}0,30 \text{ tony/tonę}$ biomasy).

Najwyższe wartości opałowe gazu uzyskuje się w przypadku połączenia czynnika zgazowującego, charakteryzującego się brakiem azotu z zastosowaniem pośredniego doprowadzenia ciepła do reaktora (przez powierzchnię wymiany lub za pomocą materiału inertnego). W takich przypadkach wartości opałowe gazu dochodzą nawet do $17\text{--}19 \text{ MJ/m}^3$. Technologie z pośrednim doprowadzeniem ciepła są rozwijane głównie w USA i Danii.

Czystość gazu jest bardzo istotnym parametrem w każdej technologii jego dalszego wykorzystania. Wysoki stopień czystości można wprawdzie uzyskać w instalacjach oczyszczania, jednak w praktyce dąży się zwykle do ograniczania struktury i rozmiarów instalacji.

Złożony system oczyszczania powoduje wzrost nakładów inwestycyjnych, kosztów eksploatacji oraz obniżenie dyspozycyjności całego układu. W układach małej mocy, gdzie planuje się wykorzystanie gazu w silnikach, w zdecydowanej większości przypadków stosowane są reaktory ze złożem stacjonarnym dolnociągowe (najniższe zawartości zanieczyszczeń). W układach z turbinami gazowymi zwykle moce układów eliminują możliwość zastosowania złoża stałego, więc stosowane są tu najczęściej reaktory fluidalne.

Reaktory, które dają najbardziej zanieczyszczony gaz, jak reaktory krzyżowo-prądowe, reaktory przeciwprądowe ze złożem stacjonarnym, reaktory, w których zgazowaniu poddawane są substancje inne niż biomasa (plastiki, oleje itp.) zwykle współpracują z palnikami gazowymi. Spalany jest w nich gorący gaz surowy, opuszczający reaktor (np. do ogrzewania pieców wapienniczych, cementowych itp.)

Wybór ze względu na rodzaj technologii wykorzystania gazu

Obecnie gaz z procesów zgazowania jest wykorzystywany: w turbinach gazowych, silnikach gazowych tłokowych, kociołach w procesach chemicznych i technologicznych.

W przypadku zastosowania turbin gazowych stosowane są reaktory ze złożami fluidalnymi (głównie ze względu na poziom mocy i wymaganych nakładów inwestycyjnych), a w przypadku zgazowania odpadów i węgla również reaktory strumieniowe.

W przypadku silników tłokowych, ze względu na małe moce, zwykle stosowane są układy ze złożem stałym, najczęściej dolnociągowe. Ostatnio coraz częściej spotykane są również instalacje z reaktorami fluidalnymi. Są to jednak zwykle pojedyncze instalacje pilotowe, charakteryzujące się dużymi nakładami inwestycyjnymi.

Jak pokazuje praktyka, w przypadku bezpośredniego spalania gazu w kociołach i instalacjach technologicznych (piece przemysłowe) wymagania dotyczące jakości gazu i sposobu pracy generatora gazu są najmniejsze. Stąd też stosowane są tu najtańsze technologie zgazowania, mające również niskie wymagania dotyczące jakości biomasy. Zwykle są to reaktory ze złożem stałym, przeciwprądowe. Nie wymagają one suszenia biomasy i czyszczenia gazu, a duży udział substancji smolistych jest tu wręcz pożądanym, gdyż wpływa na zwiększenie wartości opałowej.

W przypadku procesów chemicznych, gdzie zgazowanie prowadzone jest w celu wytwarzania gazu syntezowego, instalowane są reaktory ze złożami fluidalnymi. Zapewniają one odpowiednie moce, dyspozycyjność układu i czystość gazu.

Wybór technologii ze względu na wymagania obsługi i dyspozycyjność

Z publikowanych doświadczeń z pracy instalacji zgazowania biomasy wynika, że największe wskaźniki dyspozycyjności, prowadzące do czasów pracy przekraczających 8000 godzin/rok i najmniejsze wymagania obsługi uzyskiwane są w przypadku reaktorów fluidalnych.

W przypadku reaktorów ze złożami stacjonarnymi małych mocy należy zakładać czasy rocznej eksploatacji na poziomie od 6000 do 7000 godzin. Pozostały czas zajmują przestoje serwisowe i awaryjne urzędzeń.

W układach ze złożami stałymi dużych mocy, z reaktorami, z których gaz nie jest poddawany oczyszczaniu, a spalany jest bezpośrednio w kociołkach, uzyskiwane roczne czasy pracy sięgają również około 8000 godzin.

Podsumowanie

Z technicznego punktu widzenia jest możliwa budowa różnego typu obiektów energetycznych zintegrowanych ze zgazowaniem biomasy. Obecnie jednak komercyjna oferta urządzeń jest ograniczona. Również stosunkowo mało korzystne są warunki eksploatacji układu, złożonego z wielu elementów, z których główne to generator gazu, system oczyszczania spalin i układ energetycznego wykorzystania gazu. Niemniej jednak, po uwzględnieniu prowadzonych na świecie prac badawczych należy spodziewać się, że w niedalekiej przyszłości nastąpi szersza komercjalizacja technologii termicznego zgazowania i poprawa obecnie ciągle jeszcze mało korzystnych wskaźników opłacalności.

Wybór technologii zgazowania biomasy jest zadaniem trudnym, o charakterze indywidualnym dla danego projektu. Zwykle na wybór ten wpływ będzie miało wiele czynników, które ostatecznie ukształtują wskaźniki efektywności projektu.

W warunkach polskich ze względu na stosunkowo niską cenę energii elektrycznej, w celu osiągnięcia atrakcyjnego poziomu opłacalności inwestycji należy poszukiwać projektów, dla których spełnione będą następujące uwarunkowania:

- dostępność biomasy charakteryzującej się niskim kosztem pozyskania,
- ilość dostępnej biomasy zapewniająca odpowiednio wysoką moc reaktora, co pozwala obniżyć jednostkowe nakłady inwestycyjne,
- moc układu jest na tyle duża, że możliwa jest instalacja reaktora ze złożem fluidalnym (najwięcej reaktorów tego typu pracuje w instalacjach komercyjnych, zatem można zakładać, że jest to technologia dopracowana),
- możliwe jest zapewnienie dyspozycyjności układu technologicznego na poziomie 8000 godzin na rok (obecnie uzyskiwane w zasadzie prawie wyłącznie w reaktorach ze złożem fluidalnym i większej mocy ze złożem stałym),
- możliwe jest zagospodarowanie jak największych ilości ciepła we własnym zakresie, przez co unika się pracy układów granicznych wytwarzania ciepła (szczególnie efektywność ekonomiczna zwiększa się, gdy zastąpiona zostanie kotłownia gazowa lub olejowa),
- ze względu na miejsce instalacji projekt jest predestynowany do dofinansowania ze środków pomocowych (rozwój obszarów wiejskich, zmniejszenie zużycia paliw kopalnych bezpośrednio w miejscu instalacji, zmniejszenie szkodliwego oddziaływania na środowisko w miejscu instalacji, itp.).

LITERATURA

- [1] Foster A.D., Von Doering H.E., Hilt M.B.: Fuels flexibility in heavy-duty gas turbines. Materiały firmy *General Electric*. Schenectady, New York
- [2] Kalina J.: Wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej w skojarzeniu w układach rozproszonych małej mocy, zintegrowanych ze zgazowaniem biomasy. *Gospodarka Paliwami i Energią* 2004, nr11–12
- [3] Koch T: Development of a 3 stage fixed bed gasifier. Materiały IEA Workshop. Copenhagen 25 października 2004
- [4] Malkow T.: Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal. *Waste Management* 24 (2004)
- [5] Maniatis K.: Progress in biomass gasification – an overview Directorate General for Energy and Transport, European Commission Rue de la Loi 200, 1049 Brussels, Belgium
- [6] Milne T.A., Evans R.J., Abatzoglou N.: Biomass Gasifier “Tars”: Their Nature, Formation, and Conversion. November 1998_ NREL/TP-570-25357. National Renewable Energy Laboratory, 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401-3393, USA
- [7] Review of Finnish Biomass Gasification Technologies, OIET Report 4, ESPOO 2002
- [8] Rogulska, M., Pisarek, M. Energetyczne wykorzystanie biopaliw stałych w Polsce. Zasoby i właściwości fizykochemiczne. Konferencja Naukowo-Techniczna „Energetyczne wykorzystanie biomasy”. 2001
- [9] Skorek J., Kalina J.: Produkcja ciepła i energii elektrycznej w skojarzeniu w oparciu o biomasę. Materiały II Konferencji „Energetyka gazowa”. Szczyrk 2002
- [10] Spliethoff H. : Status of biomass gasification for power production. *IFRF Combustion Journal Article* Number 200109. November 2001
- [11] Stassen H.E., Knoef H.: Theoretical and practical aspects on the use of LCV-gas from biomass gasifiers in internal combustion engines. BTG Biomass Technology Group B.V., Enschede, Holandia
- [12] Tam P., Mazzi E., Cheng K. Edwards W.: Forest sector table: assessment of gasification technologies and prospects for their commercial application. Report prepared for: Forest Sector Table National Climate Change Process. Levelton Engineering Ltd. April 9, 1999
- [13] Van der Drift A., de Kant H.F., Rajani J.B.: Commercialisation Bivkin-Based Gasification Technology. Raport ECN – Energy Centre of Netherlands, August 2000
- [14] Van der Drift A., Boerrigter H., Coda B., Cieplik M.K., Hemmes K.: Entrained Flow Gasification of Biomass. Ash behaviour, feeding issues, and system analyses. Energy Centre of Netherlands. Report ECN-C--04-039. April 2004
- [15] Warnecke R.: Gasification of biomass: comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier. *Biomass and Bioenergy* No. 18 2000
- [16] Advanced Thermal Conversion Technologies for Energy from solid Waste. A joint report of IEA Bioenergy Programme and IEA CADDET Renewable Energy Technologies Programme. August 1998

