



Arkadiusz PRIMUS*, Czesława ROSIK-DULEWSKA**

Produkcja energii w źródłach kogeneracyjnych małej mocy z wykorzystaniem technologii zgazowania odpadów pochodzenia komunalnego. Uwarunkowania prawne i ekonomiczne

STRESZCZENIE: W artykule przedstawiono podstawowe uwarunkowania prawne i ekonomiczne dla możliwości rozwoju i wdrożeń instalacji zgazowania odpadów, produkcji energii elektrycznej i ciepłej w kogeneracji w układach małej mocy opartych na silnikach tłokowych. Wprowadzone w 2010 r. dyrektywą IED (*Dyrektywa... 2010*) nowe przepisy dotyczące technologii zgazowania odpadów wraz z implementacją do prawa krajowego w 2014 r. ustawą o odpadach (*Ustawa... 2014*) umożliwiły ich rozwój jako technik wysokosprawnych energetycznie oraz niskoemisyjnych. Stanowią one obecnie interesującą alternatywę dla klasycznych instalacji termicznego przekształcania odpadów opartych na technologii spalania. Kluczowym zagadnieniem dla rozwoju technologii zgazowania jest czystość wytwarzanego syngazu w ujęciu prawnym i technologicznym w szczególności w przypadku jego spalania w silnikach tłokowych. Z uwagi na brak spójnych przepisów dotyczących emisji zanieczyszczeń ze spalania syngazu w silnikach tłokowych zaproponowano możliwości ich interpretacji. W artykule przedstawiono również podstawowe uwarunkowania ekonomiczne i rynkowe w odniesieniu do krajowego modelu gospodarki odpadami. Wprowadzenie modelu gospodarki odpadami opartego na mechaniczno-biologicznym przetwarzaniu odpadów oraz zakazu składowania odpadów na właściwościach paliwowych wygenerowało problem oraz wzrost kosztów ich zagospodarowania.

* Doktorant Głównego Instytutu Górniczego w Katowicach, prezes zarządu INVESTEKO S.A.; e-mail: Arkadiusz.primus@investeko.pl

** Prof. zwyczaj. dr hab. inż. – Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska PAN, Uniwersytet Opolski, Samodzielna Katedra Ochrony Powierzchni Ziemi; e-mail: dulewska@ipis.zabrze.pl

Konsekwencją jest możliwy wzrost rentowności instalacji zgazowania odpadów i produkcji energii w układach kogeneracyjnych małej mocy. Ponadto wskazano i opisano możliwe dostępne źródła przychodów dla takich wdrożeń w skali lokalnej.

SŁOWA KLUCZOWE: zgazowanie odpadów, kogeneracja, energia z odpadów, rynek odpadów, rynek energii

Wprowadzenie

Układy kogeneracyjne małej mocy, w świetle wymogów wzrostu efektywności energetycznej w procesach wytwarzania energii użytkowej, stają się coraz bardziej interesującym rozwiązaniem i są coraz częściej brane pod uwagę jako rozproszone, lokalne i wysokowydajne źródła energii elektrycznej i ciepłej. Na znaczeniu zyskują układy skojarzonej produkcji energii oparte na silnikach tłokowych z zapłonem iskrowym jako technologie sprawdzone w wielu aplikacjach rynkowych z wykorzystaniem zarówno paliw systemowych (gaz ziemny), jak i paliw gazowych specjalnego pochodzenia (gaz z odmetanowania kopalni, biogaz rolniczy czy biogaz ze składowisk odpadów komunalnych).

Techniki zgazowania stają się coraz bardziej popularne m.in. ze względu na możliwość uzyskania wysokiej sprawności energetycznej oraz obniżenie emisji zanieczyszczeń. Łatwiejsze i skuteczniejsze jest bowiem oczyszczanie surowego gazu generatorowego (syntetycznego) w porównaniu do oczyszczania spalin po spaleniu paliw stałych. Główne zalety techniki obróbki gazów z procesów zgazowania to (Skorek i Kalina 2005):

- ◆ znacznie mniejszy strumień gazu generatorowego do obróbki w stosunku do strumienia spalin z procesów spalania,
- ◆ łatwiejsze usunięcie siarkowodoru z gazu syntetycznego niż dwutlenku siarki ze spalin, umożliwiające uzyskanie skuteczności redukcji emisji związków siarki na poziomie 99%,
- ◆ wysoka skuteczność usuwania metali ciężkich, rtęci, związków chloru przy połączeniu mokrych procesów oczyszczania z adsorpcją na węglu aktywnym.

Głównymi zaletami układów kogeneracyjnych małej mocy opartych na silnikach tłokowych są: ich wysoka sprawność wytwarzania energii elektrycznej, szeroka dostępność i gradacja mocy oraz stosunkowo niskie nakłady inwestycyjne.

Rozwój technologii zgazowania paliw biomasowych zaczyna wpływać również na branżę producentów tłokowych silników spalinowych. Na bazie sprawdzonych silników widoczny jest rozwój konstrukcji modyfikowanych z przeznaczeniem do spalania gazów energetycznych niesystemowych, takich jak gazy pochodzące z procesu zgazowania biomasy czy paliw z odpadów stałych pochodzenia komunalnego ze znaczącą zawartością węgla jako składnika paliwowego.

1. Podstawy prawne

Do rozwoju technologii zgazowania paliw z odpadów pochodzenia komunalnego przyczyniły się niewątpliwie zmiany w regulacjach prawnych na poziomie ramowych przepisów unijnych oraz ich implementacjach w przepisach krajowych poszczególnych państw członkowskich Unii Europejskiej. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego nr 2010/75/UE z dnia 24 listopada 2010 r. w sprawie emisji przemysłowych (*Integrated Emission Directive* – dyrektywa IED) (*Dyrektywa... 2010*) wprowadziła odrębne traktowanie technologii zgazowania i pirolizy w procesach termicznego przekształcania odpadów. Przepisy te zostały zaimplementowane do prawa krajowego we wrześniu 2014 r. zmianami do ustawy o odpadach z dnia 14 grudnia 2012 roku (Tekst jednolity Dz.U. z 2016 r., poz. 1987) (*Ustawa... 2012*).

Przepisy dyrektywy IED wprowadziły warunkowe zwolnienie z wymagań technicznych termicznego przekształcania odpadów dla technologii zgazowania lub pirolizy odpadów, a które są obowiązkowe dla procesów spalania odpadów.

Art. 42 dyrektywy wskazuje, że przepisy szczególne dotyczące termicznego przekształcania odpadów nie mają zastosowania dla instalacji zgazowania lub pirolizy, jeżeli gazy powstałe w wyniku tego przetwarzania termicznego odpadów są oczyszczone w takim stopniu, że przed spalaniem nie są już odpadami i nie mogą spowodować emisji większych niż w wyniku spalania gazu ziemnego. Przepis ten został bezpośrednio wprowadzony również do aktów wykonawczych ustawy o odpadach oraz ustawy Prawo ochrony środowiska (*Ustawa... 2017*).

Spełnienie wymagań jakościowych i użytkowych dla gazów energetycznych wytworzonych w procesach zgazowania odpadów umożliwia wyłączenie stosowania wymogów technicznych stawianych przez rozporządzenie Ministra Rozwoju (*Rozporządzenie... 2016*). Wyłączenia te dotyczą następujących wymagań technicznych:

- ◆ utrzymanie spalin ze spalania odpadów w temperaturze powyżej 850°C w czasie nie krótszym niż 2 sekundy,
- ◆ całkowita zawartość węgla organicznego w żużlach i popiołach paleniskowych niższa niż 3% lub strata przy prażeniu żużli i popiołów paleniskowych niższa niż 5% suchej masy.

Ponadto spełnienie wskazanego warunku dla gazu procesowego ze zgazowania odpadów w trybie rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie standardów emisyjnych (*Rozporządzenie... 2014*) wskazuje na brak obowiązku stosowania standardów emisyjnych, jak dla instalacji spalania lub współspalania odpadów. W trybie tych zapisów emisję ze spalania oczyszczonego gazu procesowego należy odnieść do standardów emisyjnych spalania gazu ziemnego w jednostkach energetycznych.

Wskazane powyżej zmiany legislacyjne znacząco zwiększyły możliwości zastosowania technologii zgazowania odpadów i ich energetycznego wykorzystania w bardziej efektywnych energetycznie układach wysokosprawnej kogeneracji.

Zasadniczym problemem technicznym związanym z wykorzystaniem gazów niskokalorycznych (w szczególności gazów syntezowych o dużej zawartości wodoru i tlenku węgla oraz zni-

komej zawartości metanu) jest dostosowanie silnika tłokowego lub turbiny do spalania tego rodzaju gazu. Ze względów energetycznych, korzystniejszym rozwiązaniem jest silnik, niemniej jego zastosowanie wymaga wysokiej czystości dostarczanego gazu generatorowego (syngazu) oraz ustabilizowanych parametrów energetycznych.

Technologie zgazowania odpadów wykorzystujące układy kogeneracji na bazie silników tłokowych pozwalają na osiąganie wyższych sprawności produkcji energii elektrycznej, co ma niebagatelne znaczenie w zakresie możliwości ich aplikacji w istniejącym systemie gospodarki odpadami opartym na mechaniczno-biologicznym przetwarzaniu odpadów komunalnych.

2. Właściwości użytkowe syngazu

Na właściwości użytkowe gazów energetycznych składa się wiele czynników. Zawsze należy rozpatrywać je w kontekście przeznaczenia i możliwości zastosowania w dedykowanych jednostkach, układach spalania i urządzeniach.

Technologie zgazowania biomasy są coraz częściej użytkowane i wdrażane ze względu na atrakcyjne możliwości zagospodarowania gazu generatorowego, głównie na cele energetyczne. Cechą charakterystyczną tych rozwiązań jest możliwość uzyskania wyższych sprawności produkcji energii elektrycznej w układach kogeneracyjnych opartych na silnikach tłokowych. Pojawia się coraz więcej takich aplikacji, gdzie syngaz niskokaloryczny jest produkowany i oczyszczany tak, aby spełniał wymagania techniczne dedykowanych im silników, przeznaczonych konstrukcyjnie do spalania gazów o wysokiej zawartości wodoru i tlenku węgla (jako głównych składników paliwowych) oraz znacznej zawartości gazów balastowych (np. azot, dwutlenek węgla).

W układach kogeneracyjnych opartych na silnikach tłokowych dedykowanych dla spalania syngazu niskokalorycznego o przydatności paliwa decydują głównie: skład chemiczny, wartość opałowa, odporność na spalanie detonacyjne (stukowe), prędkość spalania, zawartość zanieczyszczeń.

Skład chemiczny i wartość opałową gazu generatorowego należy odnosić do wymagań technicznych silnika przystosowanego do spalania dedykowanych dla niego mieszanek paliwowych.

Obliczeniowy, przykładowy skład syngazu z instalacji zgazowania odpadów w złożu stałym w niskociśnieniowym gazogeneratorze współprądowym dolnociągowym, gdzie czynnikiem zgazowującym jest powietrze przedstawia tabela 1.

TABELA 1. Obliczeniowy skład syngazu

TABLE 1. Computational syngas composition

Składnik	H ₂	CO	CH ₄	N ₂	CO ₂	H ₂ O
Udział objętościowy [%]	25	16	2	44	10	3

Istotnym parametrem technicznym określającym właściwości paliwa gazowego jest liczba metanowa. Określa ona jego odporność na spalanie stukowe. Liczba metanowa dla gazu ziemnego wynosi około 90%, co przekłada się na dobre własności przeciwstukowe. Syngaz o wyżej podanym składzie, mimo dużej zawartości wodoru i niskiej wartości opałowej, osiąga dobre właściwości przeciwstukowe porównywalne z gazem ziemnym.

Proces zgazowania biomasy z podwyższoną zawartością poliolefin i celulozy, gdzie czynnikiem zgazującym jest powietrze, charakteryzuje się podwyższonym udziałem wodoru w stosunku do tlenku węgla, co ma znaczący wpływ na jego właściwości użytkowe, szczególnie w odniesieniu do kinetyki spalania w silniku tłokowym.

W przypadku spalania gazów niskokalorycznych czynnikiem decydującym o przydatności mieszanki paliwowej do spalania w silniku tłokowym jest prędkość spalania (tab. 2). Musi się ona utrzymywać w określonych granicach. Prędkość spalania w silniku nie może być zbyt mała, aby nie doprowadzić do niepełnego spalania paliwa w cylindrze. Jednocześnie zbyt wysoka prędkość spalania może prowadzić do spalania detonacyjnego (Skorek i Kalina 2005).

TABELA 2. Prędkość spalania wybranych gazów palnych

TABLE 2. Combustion speed of selected flammable gases

Paliwo gazowe	Wodór	Tlenek węgla	Metan	Propan	Gaz ziemny
Prędkość spalania [m/s]	0,302	0,024	0,041	0,045	0,041

Z przytoczonych wartości wynika, że największą prędkość spalania dostępnych użytkowych paliw gazowych posiada wodór. Wynosi ona aż 0,302 m/s.

Przyjmuje się, że minimalna prędkość spalania gazu niskokalorycznego w gazowych silnikach tłokowych wynosi 0,008 m/s (Skorek i Kalina 2005). Tak niskie wartości prędkości spalania są charakterystyczne dla gazów o niskiej zawartości wodoru pochodzących głównie ze zgazowania biomasy drzewnej i kształtują się na poziomie 0,015 m/s.

Syngaz produkowany w instalacji zgazowania powietrzem w warunkach atmosferycznych (niskociśnieniowy), o wysokiej zawartości wodoru, będzie miał wyższą prędkość spalania. Można bezpiecznie przyjąć, że będzie się ona kształtować w granicach 0,03–0,04 m/s i będzie tym samym zbliżona do prędkości spalania gazu ziemnego. Prędkość spalania gazu ma również kluczowe znaczenie w procesie spalania w silniku tłokowym, w odniesieniu do czystości gazów odlotowych w zakresie stężeń tlenku węgla i sadzy.

Właściwości użytkowe syngazu w porównaniu do gazu ziemnego należy rozpatrywać w odniesieniu do jednostek energetycznych, w których są one spalane. Producenci silników tłokowych w ostatnich latach dostrzegli możliwości rynkowe wykorzystania syngazu i rozwinęli konstrukcje dedykowane.

Należy jednocześnie podkreślić, że układy kogeneracyjne pracujące na syngazie o podwyższonej zawartości wodoru mogą pracować równie dyspozycyjnie i w sposób zbliżony technicznie do konstrukcji dedykowanych dla gazów systemowych, takich jak gaz ziemny.

3. Czystość syngazu

Kluczowym zagadnieniem w zakresie możliwości wykorzystania technologii zgazowania odpadów pochodzenia komunalnego w układach kogeneracyjnych opartych na silnikach tłokowych jest czystość syngazu.

Jakość syngazu zgodnie z wymogiem dyrektywy IED (Dyrektywa... 2010) jest bezpośrednio odniesiona do wymogów stawianych dla gazu ziemnego w zakresie jego czystości.

Jakość gazu ziemnego określona jest w normach: PN-C-04752:2011 (Gaz ziemny – Jakość gazu w sieci przesyłowej) oraz PN-C-04753:2011 (Gaz ziemny – Jakość gazu dostarczanego odbiorcom z sieci dystrybucyjnej). Zgodnie z tymi normami w zakresie zawartości zanieczyszczeń gaz ziemny musi spełnić wymagania przedstawione w tabeli poniżej. W tabeli 3 wskazano jednocześnie możliwe metody oczyszczania syngazu do wymaganych normami standardów.

TABELA 3. Jakościowe wymagania dotyczące gazu ziemnego zgodnie z obowiązującymi normami i metody oczyszczania syngazu

TABLE 3. Qualitative natural gas requirements in accordance with applicable standards and syngas purification methods

Lp.	Wielkość	Jednostka	Wartość dopuszczalna	Dostępne metody oczyszczania syngazu
1.	Zawartość siarkowodoru	mg/Nm ³	7,0	metody: mokre – absorpcja zasadowa
2.	Zawartość siarki merkaptanowej	mg/Nm ³	16,0	
3.	Zawartość siarki całkowitej	mg/Nm ³	40,0	
4.	Zawartość par rtęci	µg/Nm ³	30,0	adsorpcja na węglu aktywnym
5.	Zawartość tlenu nie większa niż	% (mol/mol)	0,2	sterowanie i kontrola procesu zgazowania. wymogi technologiczne
6.	Zawartość pyłu o średnicy cząstek większej niż 5 µm	mg/Nm ³	1	metody łączone – separacja odśrodkowa, filtracja tkaninowa, filtry ziarniste, absorpcja w metodach mokrych
7.	Zawartość węglowodorów mogących ulec kondensacji w temperaturze – 5°C przy ciśnieniu panującym w gazociągu ¹)	mg/Nm ³	30	metody łączone – destrukcja katalityczna i termiczna, kondensacja w metodach chłodzenia szokowego, filtracja na filtrach olejowych, ziarnistych i adsorpcja na węglu aktywnym

¹ Warunki odniesienia: T₂ = 273,15 K (0°C); p₂ = 101,325 kPa.

Należy jednak zwrócić uwagę, że zgodnie z wymaganiami większości silników przystosowanych do spalania gazów niskokalorycznych substancje smoliste mogące ulec kondensacji w oczyszczonym gazie nie powinny występować. Oczyszczony gaz może zawierać do 100 mg/Nm³ lekkich, niekondensujących smół (maksymalnie jedno-, dwu- i trzypierścieniowych związków

organicznych), tak jak w gazie ziemnym. Na podstawie dostępnych danych literaturowych można stwierdzić, że w przeliczeniu na ksylen ilość tych węglowodorów w gazie ziemnym może wynosić do 100 mg/Nm³ (Syngas Products Ltd 2015).

Dotrzymanie powyższych wartości jakościowych zanieczyszczeń w produkowanym i oczyszczanym syngazie jest niezwykle istotne również ze względu na wymagania producenta silnika. Zastosowane silniki kogeneracyjne, przystosowane do spalania gazów niskokalorycznych, wymagają czystości gazu na zbliżonym poziomie do czystości gazu ziemnego.

Czystość syngazu należy również rozpatrywać w ujęciu wymagań prawnych stawianych czystości gazów odlotowych i wynikowo emisji zanieczyszczeń do powietrza oraz technologicznych wymagań silników.

Zaletą instalacji termicznego przekształcania odpadów opartej na technologii zgazowania jest oczyszczanie znacznie mniejszych strumieni objętościowych syngazu w stosunku do gazów odlotowych ze spalania. Należy jednak podkreślić, że gaz zawierający tlenek węgla oraz wodór jako główne składniki paliwowe podwyższa wymagania technologiczne dla technologii oczyszczania strumieni gazowych.

Główne składniki zanieczyszczające w gazie generatorowym ze zgazowania atmosferycznego odpadów pochodzenia komunalnego to pyły, smoły kondensujące oraz zanieczyszczenia gazowe o charakterze kwaśnym, do których należy zaliczyć przede wszystkim siarkowodór oraz związki chloru.

Ze względu na to, że przepisy dotyczące emisji zanieczyszczeń z procesu zgazowania odpadów w instalacjach spełniających warunek art. 42 dyrektywy (Dyrektywa... 2010) należy odnosić bezpośrednio do standardów emisyjnych dla instalacji energetycznych spalania gazu ziemnego, zatem normowaniu podlegać będą cztery podstawowe zanieczyszczenia: pył, dwutlenek siarki, tlenek węgla oraz tlenki azotu w przeliczeniu na dwutlenek azotu.

Dla układów kogeneracyjnych opartych na silnikach tłokowych brak jest obecnie w regulacjach krajowych standardów emisyjnych, co uniemożliwia bezpośrednią ocenę jakości gazów odlotowych ze spalania syngazu. Pozwalają na to standardy wyznaczone w innych krajach członkowskich, np. niemiecka norma TA LUFT określa dopuszczalne stężenia zanieczyszczeń w gazach odlotowych ze spalania gazu ziemnego w silnikach tłokowych.

Do głównych pozostałych zanieczyszczeń emitowanych podczas procesów termicznego przekształcania odpadów należy zaliczyć: chlorowodór, fluorowodór, lotne związki organiczne, dioksyny i furany, metale ciężkie, w tym rtęć. W tym zakresie zanieczyszczeń należy rozpatrzyć emisję z procesów zgazowania odpadów.

W przypadku metali ciężkich znaczna ich ilość przechodzi do popiołu odbieranego bezpośrednio z gazogeneratora, a pozostała część w postaci stałej (głównie soli – chlorków, bromków, fluorków) jest unoszona wraz z pyłem w produkowanym gazie syntetycznym. Wyjątek stanowi rtęć, której większa część (99,1 %) występuje w postaci par (Babiński i in. 2012).

Rtęć jest separowana dodatkowo w układach stosowanych do oczyszczania gazu generatorowego w technikach adsorpcji np. węgli aktywnych lub zeolitach.

Podobnie jak metale, także część chloru zawarta w paliwie (ok. 50%), w wyniku zachodzących reakcji zostaje związana w postaci chlorków w popiołach oraz w pyłach. Pozostała część pozostaje w gazie syntetycznym jako chlorowodór (Wielgosiński 2016).

Związki chloru oraz fluoru występujące w gazie generatorowym usuwane są z wysoką sprawnością w układach mokrego oczyszczania syngazu opartych na technologiach absorpcji zasadowej. Ze względów technologicznych wymagań silników tłokowych są one usuwane przed spalaniem w silniku tłokowym, w stopniu pozwalającym na osiągnięcie standardów emisyjnych dla instalacji termicznego przekształcania odpadów.

Lotne związki organiczne w postaci węglowodorów alifatycznych i aromatycznych oraz ich pochodne stanowią główny składnik smół kondensujących podczas chłodzenia syngazu. Są one istotnym problemem technologicznym w eksploatacji silników tłokowych. W zasadzie produkcji stawiają wymóg braku smół kondensujących w spalonym gazie generatorowym, co ma najistotniejszy wpływ na dobór technologii ich separacji oraz wynikowo na niski poziom emisji lotnych związków organicznych.

Powstawanie dioksyn i furanów uwarunkowane jest ilością związków chloru w przekształcanym termicznie materiale oraz tlenu w procesie spalania. Reakcje tworzenia się dioksyn i furanów przebiegają w wysokich temperaturach (500–700°C), w obecności znaczącej ilości chloru, tlenu i materii organicznej. Proces zgazowania odpadów prowadzony jest w temperaturach powyżej 900°C, a więc poza zakresem temperatur, w którym pierwotnie powstają PCDD i PCDF (polichlorowane dibenzo-p-dioksyny i dibenzofurany). Jest to już raczej temperatura destrukcji większości omawianych związków. Natomiast wiadomo, że dioksyny i furany mogą powstawać także wtórnie, w wyniku tzw. mechanizmu *de novo*, ale poza strefą spalania z cząsteczkowego węgla (niewypalony węgiel znajdujący się w cząsteczkach pyłu i sadzy) oraz chloru w temperaturze 200–500°C (optymalna temperatura syntezy *de novo* wynosi 350°C). Synteza *de novo* jest wolną reakcją katalityczną, heterofazową, w której dioksyny powstają bez tworzenia się gazowych produktów pośrednich. Podstawowe znaczenie w tym procesie ma stężenie wolnych rodników chloru, a także zawartość tlenu (Wielgosiński 2016).

Jednak w odróżnieniu od klasycznego spalania, w takich procesach jak piroliza i zgazowanie nie powstają dioksyny i furany lub ich ilość jest znacznie mniejsza, z uwagi na brak lub ograniczenie zawartości tlenu w tych procesach (Piecuch i in. 2002).

Ponieważ w układach kogeneracji opartych na silniku tłokowym spalany będzie tylko i wyłącznie oczyszczony syngaz praktycznie pozbawiony chloru i jego związków, możliwości występowania reakcji tworzenia się dioksyn i furanów są znacząco ograniczone.

Zastosowanie układów kogeneracyjnych opartych na silnikach tłokowych oraz spełnienie wymogu porównania emisji jak ze spalania gazu ziemnego wymuszają wysoki poziom czystości gazów odlotowych ze spalania syngazu ze zgazowania odpadów w odniesieniu do standardów emisyjnych dla instalacji termicznego przekształcania odpadów opartych na technologiach spalania.

Jak wspomniano wcześniej, w przypadku zgazowania odpadów ani obecne przepisy wspólnotowe, ani krajowe nie regulują wymagań dotyczących emisji zanieczyszczeń, poza normowaniem emisji przy spalaniu gazu ziemnego. Nie mniej jednak mając na uwadze względy ochrony środowiska oraz uwarunkowania technologiczne procesu zgazowania należy odnieść się w takich przypadkach do wymagań stawianych instalacjom termicznego przekształcania odpadów.

Na podstawie zestawionych wymagań technologicznych silników tłokowych dedykowanych dla gazów specjalnych niskokalorycznych oraz wymagań prawnych z uwzględnieniem przepi-

sów art. 42 dyrektywy IED (dyrektywa 2010) poniżej (tab. 4) zaproponowano źródła odniesienia do regulacji prawnych dla określenia wymagań w zakresie czystości gazów odlotowych w ujęciu jakościowym.

TABELA 4. Propozycja określenia wymogów prawnych dla jakości gazów odlotowych ze spalania syngazu pochodzącego ze zgazowania odpadów

TABLE 4. Proposed definition of legal requirements for the quality of combustion gases from the combustion of syngas derived from the gasification of waste

Lp.	Nazwa substancji	Wymóg prawny	Źródła regulacji prawnych
1.	Pył	art. 42 dyrektywy IED, art. 163. ust. 2a ustawy o odpadach	regulacje dotyczące stężeń dopuszczalnych ze spalania gazu ziemnego w silnikach tłokowych w krajach członkowskich UE
2.	Dwutlenek siarki		
3.	Tlenek węgla		
4.	Tlenki azotu		
5.	Substancje organiczne w postaci gazów i par wyrażone jako całkowity węgiel organiczny	brak wymogu – propozycja odniesienia do krajowych regulacji dotyczących stężeń dopuszczalnych w gazach odlotowych w instalacjach termicznego przekształcania odpadów	rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń spalania lub współspalania odpadów z dnia 4 listopada 2014 r., Dz.U. poz. 1546
6.	Chlorowodór		
7.	Fluorowodór		
8.	Rtęć		
9.	Metale ciężkie		
10.	Dioksyiny i furany		

4. Uwarunkowania ekonomiczne

Ocena ekonomiczna przedsięwzięć w zakresie energetycznego zagospodarowania odpadów jest uwarunkowana wieloma czynnikami rynkowymi. Dla instalacji termicznego przekształcania odpadów opartych na technologii spalania są one dobrze rozpoznane, dzięki istniejącym i eksploatowanym obiektom, gdzie planowane modele finansowe zostały zweryfikowane w realnych warunkach rynkowych. Założenia finansowe dla instalacji termicznego przekształcania odpadów niskokalorycznych (zmieszane odpady komunalne) opierają się o funkcjonujące modele gospodarki odpadami komunalnymi. Głównym źródłem przychodów finansowych i rentowności dla takich obiektów jest cena odpadu „na bramie” jako kluczowy element struktury przychodów. Instalacje TPOK (Termicznego Przekształcania Odpadów Komunalnych) są obecnie budowane jako elektrociepłownie z układem kogeneracyjnym opartym na turbinach parowych. Podstawowym produktem jest energia cieplna, natomiast produktem dodatkowym

(wynikowym) energia elektryczna. Wybudowane w ostatnich kilku latach pierwsze 5 krajowych instalacji w obecnych uwarunkowaniach rynkowych gospodarki odpadami oraz rynku energii zdeterminowały ich wydajności w granicach od 94 tys. Mg/rok do 220 tys. Mg/rok.

Są to obiekty relatywnie duże, które muszą być osadzone w rozbudowanych regionach gospodarki odpadami, takich jak Kraków czy Poznań, lub obsługiwać kilka mniejszych jak rejon Torunia i Bydgoszczy oraz okolic. Muszą one być zlokalizowane w pobliżu węzłów ciepłowniczych zdolnych przejąć systemowo całość wyprodukowanej energii cieplnej zarówno w sezonie zimowym, jak i letnim, co jest warunkiem ich rentowności.

Wprowadzony w Polsce model gospodarki odpadami oparty na mechaniczno-biologicznym przetwarzaniu odpadów, budowie sortowni odpadów w ramach Regionalnych Instalacji Przetwarzania Odpadów Komunalnych obsługujących co najmniej 120 tys. mieszkańców wymusiły systemowy przepływ odpadów, ich koncentrację przestrzenną oraz stabilizację jakościową strumienia pozostałego po sortowaniu, tzw. frakcji resztkowej o dobrych właściwościach paliwowych.

Następstwem wprowadzenia nowego modelu gospodarki odpadami w Polsce był wymóg prawny zakazu składowania odpadów o określonych właściwościach paliwowych (do 6 MJ/kg) ([Rozporządzenie... 2015](#)). Przepis ten wygenerował nadpodaż odpadów resztkowych z sortowni odpadów komunalnych i problem z ich zagospodarowaniem. Konsekwencją jest wzrost kosztów ich odzysku energetycznego ze względu na niewystarczającą ilość instalacji termicznego przekształcania odpadów w kraju.

W tej sytuacji rozwój technologii wytwarzania paliwa zastępczego/alternatywnego, z tzw. grubej frakcji (nadsitowej) odpadów komunalnych w zakładach mechaniczno-biologicznego przetwarzania (MBP), to jedno z istotnych wyzwań stojących przed gospodarką odpadami. Z danych eksploatacyjnych funkcjonujących w Polsce instalacji MBP wynika, że tzw. frakcja nadsitowa zwana często pre-RDF (nieczyszczona – kod 19 12 12) lub RDF (po oczyszczeniu i standaryzacji – kod 19 12 10) stanowi około 30–40% początkowej masy odpadów wprowadzanej do instalacji. Oznacza to, że docelowo do dyspozycji będziemy mieli około 3–4 mln Mg frakcji palnej wydzielonej z odpadów komunalnych – RDF (*Refuse Derived Fuel*), o wartości opałowej na poziomie 13–18 MJ/kg. W ten sposób już obecnie mamy do zagospodarowania w Polsce około 2 mln Mg RDF rocznie.

Pierwsza pilotowa instalacja zgazowania przeznaczona dla wydzielonej frakcji nadsitowej z odpadów komunalnych (z MBP) z komunalnymi osadami ściekowymi będzie uruchamiana w ramach projektu LIFE COGENERATION.PL finansowanego ze środków Komisji Europejskiej, NFOŚiGW oraz prywatnego inwestora (INVESTEKO S.A.).

Efektem najistotniejszym jest jednak wzrost rentowności instalacji do energetycznego przekształcania odpadów i możliwość obniżenia progu rentowności oraz ich wydajności dla instalacji planowanych.

Jak wskazano wcześniej, technologia zgazowania odpadów w nowym trybie przepisów dyrektywy IED pozwala na uzyskanie większych sprawności wytwarzania energii elektrycznej w zintegrowanych układach kogeneracji opartych na silnikach tłokowych w stosunku do układów opartych na turbinach parowych. Energia cieplna ma charakter wtórny i stanowi przychód dodatkowy w modelu finansowym. Ma to niebagatelny wpływ na dostępność potencjal-

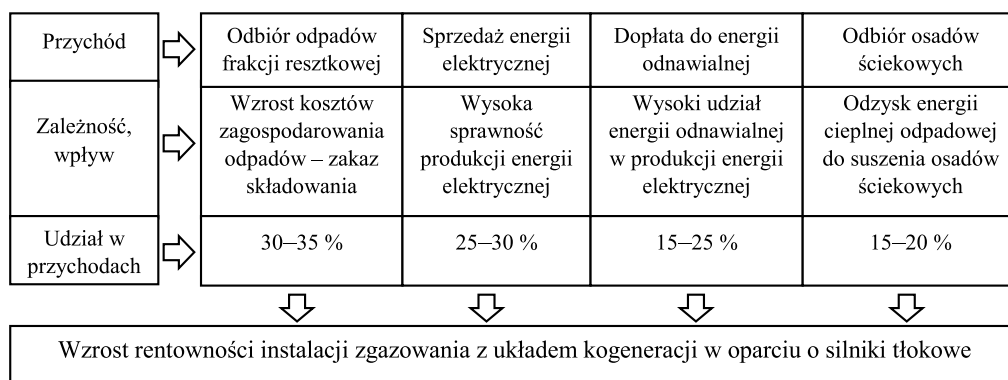
nych lokalizacji, obniżenie progu rentowności takich rozwiązań i tym samym budowę instalacji o mniejszych wydajnościach zagospodarowania odpadów posiadających charakter lokalny.

Następnym istotnym czynnikiem wpływającym na możliwość zwiększenia rentowności instalacji zgazowania odpadów skojarzonym z układem kogeneracji na bazie silnika tłokowego jest nowe Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 czerwca 2016 r. w sprawie warunków technicznych kwalifikowania części energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów (Dz.U. 2016, poz. 847). Wprowadza ono ryczałtowy model rozliczania paliw odnawialnych z podziałem na ich poszczególne rodzaje. Model rozliczania paliw odnawialnych w strumieniu odpadów zgodnie z tym rozporządzeniem pozwala osiągać wyższe udziały energii odnawialnej i w konsekwencji uzyskać wyższy poziom wsparcia finansowego we wprowadzonym w IV kwartale 2016 roku systemie aukcyjnym sprzedaży energii odnawialnej.

Ponadto strumień energii cieplnej z układu kogeneracji może zostać z powodzeniem również wykorzystany do suszenia osadów ściekowych wprowadzanych następnie jako strumień pomocniczy do zgazowania paliwa formowanego, gdzie bazą jest frakcja resztkowa odpadów komunalnych. Wykorzystanie ciepła odpadowego i osadów wymaga doposażenia instalacji w suszarnię osadów ściekowych pracującą w układzie hybrydowym z instalacją zgazowania i kogeneracji.

Wszystkie wymienione zależności rynkowe i technologiczne mają ostatecznie wpływ na zakres i kształt struktury przychodów. Zwiększona ilość źródeł przychodów, jej rozproszenie i dywersyfikacja pozwalają na rozpatrywanie możliwości wdrożeń układów zgazowania zintegrowanych z siłowniami kogeneracyjnymi opartymi na silnikach tłokowych wraz ze współpracującymi suszarniami osadów ściekowych.

Zestawienie źródeł przychodów, ich udział w strukturze oraz zależności rynkowych przedstawiono na poniższym schemacie (rys. 1).



Rys. 1. Struktura przychodów, udział oraz zależności rynkowe dla instalacji zgazowania odpadów z układami kogeneracyjnymi opartymi na silnikach tłokowych

Fig. 1. Income structure, market share and market share for waste gasification installations with cogeneration systems based on piston engines

Jak widać, rozbudowana struktura przychodów może pozwolić na obniżenie progu rentowności oraz zwiększa stabilność poprzez dywersyfikację dla takich przedsięwzięć. Konsekwencją

jest możliwość rozpatrywania wdrożeń instalacji o wydajności od 25 tys. Mg/rok paliwa wytworzonego na bazie frakcji resztkowej/nadsitowej odpadów komunalnych oraz osadów ściekowych.

Wprowadzone zmiany w przepisach dotyczące technologii zgazowania oraz wdrożony od kilku lat system gospodarki odpadami oparty na mechaniczno-biologicznym przetwarzaniu odpadów komunalnych pozwala realnie finansowo analizować wdrożenia technologii zgazowania i produkcji energii w skali lokalnej.

Podsumowanie

Do rozwoju technologii zgazowania paliw wytworzonych z odpadów pochodzenia komunalnego przyczyniły się zmiany w regulacjach prawnych na poziomie ramowych przepisów unijnych oraz ich implementacjach w przepisach krajowych poszczególnych członków Unii Europejskiej.

Zatem techniki zgazowania stają się coraz bardziej popularne m.in. ze względu na możliwość uzyskania wysokiej sprawności energetycznej oraz obniżenie emisji zanieczyszczeń. Łatwiejsze i skuteczniejsze jest bowiem oczyszczanie surowego gazu generatorowego (syntetycznego), a główną zaletą układów kogeneracyjnych małej mocy opartych na silnikach tłokowych jest ich wysoka sprawność w wytwarzaniu energii elektrycznej, szeroka dostępność i gradacja mocy oraz stosunkowo niskie nakłady inwestycyjne.

Ponadto przepisy dyrektywy IED wprowadziły warunkowe zwolnienie z wymagań technicznych termicznego przekształcania odpadów dla technologii zgazowania lub pirolizy odpadów, które są obowiązkowe dla procesów spalania odpadów. Zwolnienie takie jest możliwe jedynie w przypadku gdy właściwości użytkowe wytworzonego gazu generatorowego z przeznaczeniem do celów energetycznych są zbliżone do parametrów gazu ziemnego.

Zastosowanie i rozwój technologii zgazowania odpadów w skojarzonych układach wysoko-sprawnej kogeneracji uzależnione jest zatem od czystości gazu generatorowego oraz jego energetycznych właściwości użytkowych.

W przypadku zgazowania odpadów ani obecne przepisy wspólnotowe, ani krajowe nie regulują wymagań dotyczących emisji zanieczyszczeń, poza normowaniem emisji przy spalaniu gazu ziemnego.

Ze względu na to, że przepisy dotyczące emisji zanieczyszczeń z procesu zgazowania odpadów w instalacjach spełniających warunek art. 42 dyrektywy IED należy odnosić bezpośrednio do standardów emisyjnych dla instalacji energetycznych spalania gazu ziemnego, zatem normowaniu podlegać będą cztery podstawowe zanieczyszczenia: pył, dwutlenek siarki, tlenek węgla oraz tlenki azotu w przeliczeniu na dwutlenek azotu.

Nie mniej jednak mając na uwadze względy ochrony środowiska oraz uwarunkowania technologiczne procesu zgazowania, należy odnieść się w takich przypadkach do wymagań stawianych instalacjom termicznego przekształcania odpadów.

Literatura

- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego nr 2010/75/UE z dnia 24 listopada 2010 r. w sprawie emisji przemysłowych (ang. Integrated Emission Directive – dyrektywa IED).
- Ustawa o odpadach z dnia 14 grudnia 2012 roku (Tekst jednolity Dz.U. z 2016, poz. 1987).
- Ustawa Prawo Ochrony Środowiska z dnia 27 kwietnia 2001 r. (Tekst jednolity Dz.U. z 2017, poz. 519, 785, 898, 1089).
- Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 21 stycznia 2016 r. w sprawie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów oraz sposobów postępowania z odpadami powstałymi w wyniku tego procesu (Dz.U. z 2016, poz. 108).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 4 listopada 2014 r. w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń spalania lub współspalania odpadów (Dz.U. 2014, poz. 1546).
- Polska Norma PN-C-04752:2011 (Gaz ziemny – Jakość gazu w sieci przesyłowej).
- Polska Norma PN-C-04753:2011 (Gaz ziemny – Jakość gazu dostarczanego odbiorcom z sieci dystrybucyjnej).
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach, Dz.U. z 2015, poz. 1277).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 czerwca 2016 r. w sprawie warunków technicznych kwalifikowania części energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów (Dz.U. 2016, poz. 847).
- SKOREK, J. i KALINA, J. 2005. *Gazowe układy kogeneracyjne*. Warszawa: Wydawnictwo naukowo-Techniczne.
- BABIŃSKI i in. 2012 – BABIŃSKI, P., ROBAK, Z., ŁABOJKO, G., FIGIEL, Z. i KALINOWSKI, K. 2012. Przystosowanie gazu koksowniczego do wykorzystania w energetyce i chemii. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 15, z. 4.
- WIELGOSIŃSKI, G. 2016. *Termiczne przekształcanie odpadów komunalnych – wybrane zagadnienia*. Racibórz: Wyd. DOOSAN.
- PIECUCH i in. 2002. PIECUCH, T., DĄBEK, L. i JURASZKA, B. 2002. *Spalanie i piroliza odpadów oraz ochrona powietrza przed szkodliwymi składnikami spalin*. Koszalin: Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej.
- SYNGAS PRODUCTS LTD, Canford Low Carbon Energy Facility, EPR SWIP PERMIT APPLICATION SUPPORT DOCUMENT, październik 2015 r.

Arkadiusz PRIMUS, Czesława ROSIK-DULEWSKA

Energy production in low-power cogeneration systems using the gasification technology of post-municipal waste. The legal and economic conditions

Abstract

The article presents the basic legal and economic conditions for the development and implementation of waste gasification, electricity and heat production in cogeneration in low power systems based on reciprocating motors. The new regulations on waste gasification technologies under the IED, introduced in 2010 and implemented in Polish law in 2014, enabled them to develop as energy efficient and low emission technologies. They are now an interesting alternative to conventional thermal waste incineration plants. The key issue for the development of gasification technology is the purity of the syngas produced in legal and technological terms, particularly when it is combusted in piston engines. Due to the lack of consistent regulations on emissions from the combustion of syngas in piston engines, the possibility of their interpretation was proposed. The article also presents basic economic and market conditions for the national model of waste management. The introduction of the waste management model based on the mechanical and biological treatment of waste and the landfilling ban of calorific waste generated the problem and increased the cost of their disposal. The consequence is the possible increase in the profitability of waste gasification and power generation in low power cogeneration systems. In addition, potential sources of revenue for such local implementations were identified and described.

KEYWORDS: gasification of waste, cogeneration, energy from waste, waste market, energy market