

Review of selected waste gasification technologies

Przegląd wybranych technologii zgazowania odpadów

DOI: 10.15199/62.2024.8.11

A review, with 58 refs., of technologies for gasification of various types of waste towards the prodn. of synthesis gas. Existing technologies were discussed, considering the method of heat supply, the gasification factor (air, steam, CO₂, oxygen) and reactor type. The construction of the main reactor types such as a fixed bed reactor (co-current, counter-current and cross-current), a fluidized bed (bubble and circulating), an entrained fluidized bed, as well as rotary furnace and plasma reactors were discussed. The main advantages and limitations of the gasification methods and also the possibilities of using the obtained synthesis gas were presented.

Omówiono technologię zgazowania różnych rodzajów odpadów w kierunku produkcji gazu syntezowego. Przedstawiono przegląd istniejących technologii, ich główne zalety, ograniczenia oraz możliwości wykorzystania wytworzonego gazu syntezowego. O jakości wyprodukowanego gazu syntezowego decydują właściwości fizyczno-chemiczne surowca, czyli odpadów, rodzaj zastosowanej technologii i warunki prowadzenia procesu oraz wielkość instalacji. Przedstawiono technologie zgazowania prowadzone w reaktorach ze złożem stałym lub w złożu fluidalnym, które zapewnia elastyczność utylizowanego wsadu i jest odpowiednim rozwiązaniem w przypadku heterogenicznego zgazowania odpadów w instalacjach średniej i dużej skali, czyli 50–100 MWth. Rozwiązania technologiczne procesów zgazowania są już stosowane z dobrymi efektami ekonomicznymi i ekologicznymi od wielu lat, niemniej istniejące technologie cały czas są rozwijane i wdrażane jako nowe rozwiązania oparte na dotychczasowych konstrukcjach, jednak zwiększające ich efektywność poprzez różnego rodzaju modyfikacje i stosowanie nowych materiałów lub stanowiące hybrydy istniejących rozwiązań.

Keywords: waste gasification technologies, synthesis gas, review

Słowa kluczowe: technologie zgazowania odpadów, gaz syntezowy, przegląd

Wzrost liczby ludności na świecie i wzrost poziomu konsumpcji przewidują, że do 2050 r. na świecie wytwarzanych będzie prawie 3,4 mld m³ odpadów. Przykładowo w Unii Europejskiej wg Eurostatu w 2020 r. wytworzono 505 kg odpadów komunalnych w przeliczeniu na jednego mieszkańca, gdzie Austria, Dania i Luksemburg (odpowiednio 834, 814 i 790 kg) stanowiły pierwszą trójkę krajów z największą ilością wytworzonych odpadów. Ze wszystkich odpadów komunalnych wytworzonych w UE w 2020 r. 48% zostało poddanych recyklingowi (uwzględniając recykling i kompostowanie), 26% poddano spalaniu, a ok. 26% trafiło

na składowiska¹⁾. Jeśli chodzi o wytwarzanie odpadów wg sektorów, budownictwo odpowiada za 37,1%, górnictwo i wydobywanie 23,4%, produkcja 10,9%, ścieki 10,7%, gospodarstwa domowe 9,5%, sektor usług 4,5%, energetyka 2,3% oraz rolnictwo, leśnictwo i rybołówstwo 1,0%¹⁾.

Sposób zagospodarowania odpadów zmienia się w ostatnich latach wraz z rozwojem alternatywnych metod recyklingu, kompostowania i przetwarzania odpadów na energię. Mimo to znaczna ilość wytwarzanych odpadów w dalszym ciągu trafia na składowiska, gdzie są gromadzone, powodując wiele problemów środowiskowych. Odpady z różnych



Dr inż. Rafał MIĘSO (ORCID: 0000-0003-3506-5819) ukończył studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. Pracuje w Katedrze Systemów Energetycznych i Urzędzeń Ochrony Środowiska tej samej uczelni. Specjalność – inżynieria mechaniczna.



Dr hab. inż. Krzysztof KOŁODZIEJCZYK, prof. AGH (ORCID: 0000-0001-9479-7505), w roku 1999 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki w AGH w Krakowie. Jest profesorem w Katedrze Systemów Energetycznych i Urzędzeń Ochrony Środowiska tej uczelni. Specjalność – ochrona środowiska, urządzenia sedymentacyjne.

* Adres do korespondencji:

Katedra Systemów Energetycznych i Urzędzeń Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel.: (12) 617-31-09, e-mail: mieso@agh.edu.pl

sektorów gospodarki wymagają przetworzenia, począwszy od odwodnienia i zagęszczenia w przypadku ścieków²⁾, poprzez zabezpieczenie przed pyleniem w przypadku drobnoziarnistych materiałów pylistych aż do odpowiedniej immobilizacji w przypadku odpadów niestabilnych chemicznie. Aby uniknąć problemów podczas składowania, Europejska Agencja Środowiska wyznaczyła sobie za cel ograniczenie ilości składowanych odpadów do 10% do 2035 r.³⁾. Te działania mają na celu ograniczyć problemy środowiskowe związane z zanieczyszczeniem zasobów wód gruntowych poprzez odcieki, emisję gazów cieplarnianych z gazów składowiskowych, pylenia i unoszenia mikrocząstek stałych oraz zanieczyszczenia i użytkowania gleby⁴⁾. Mając na celu znalezienie alternatywnych rozwiązań dla składowania odpadów, ale również i produkcji energii ze względu na coraz większe jej zapotrzebowanie, postawiono większy akcent na takie rozwiązania, jak spalanie⁵⁾, fermentacja beztlenowa z produkcją biogazu^{6, 7)}, piroliza i zgazowanie termiczne z wykorzystaniem odpadów jako surowca⁸⁻¹⁰⁾.

Wykorzystanie odpadów do produkcji energii oferuje wiele korzyści, takich jak zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych¹¹⁾, zrównoważona produkcja energii elektrycznej i ciepła¹²⁾, bardziej wydajna alternatywa dla przetwarzania odpadów¹³⁾ oraz wzmocniony element gospodarczy poprzez tworzenie nowych miejsc pracy w sektorze odpadów¹⁴⁾. Jednakże niejednokrotnie spotykane są opory społeczne związane z wdrażaniem technologii termicznej utylizacji odpadów, ponieważ istnieją obawy o ich niekorzystny wpływ na człowieka i otaczające środowisko. Dlatego tak ważna jest edukacja ekologiczna pokazująca zalety, ale również i wady tych rozwiązań, aby przekonać społeczeństwo, że nie ma idealnego rozwiązania, ale bez wdrażania tych rozwiązań będzie jeszcze gorzej i niebezpieczniej, co pokazują wydarzenia związane z paleniem się składowisk odpadów.

Wśród wszystkich rozwiązań stosowanych w zakładach przeróbki odpadów zgazowanie termiczne zostało wykorzystane do przetwarzania odpadów stałych jako surowca do produkcji ciepła i energii elektrycznej oraz gazu syntezowego. Gaz syntezowy, potocznie nazywany syngazem, to produkt gazowy nadający się do wykorzystania jako paliwo, składający się głównie z tlenku węgla (CO), wodoru (H₂), azotu (N₂), ditlenku węgla (CO₂) i lekkich węglowodorów (np. CH₄, C₂H₄, C₂H₆). Skład gazu syntezowego różni się w zależności od rodzaju zastosowanego reaktora gazu, parametrów operacyjnych i składu surowca^{15, 16)}.

Ogólne zasady procesu zgazowania

Zgazowanie termiczne (pojęcie związane z prowadzeniem procesu w wysokich temperaturach) można zdefiniować jako proces, w którym surowiec w postaci ciała stałego można przekształcić w mieszaninę gazów

zwaną gazem syntezowym, zawierającą głównie metan (CH₄), ditlenek węgla (CO₂), tlenek węgla (CO), wodór (H₂) i smoły¹⁷⁾. Syngaz może być później wykorzystany jako paliwo w silnikach spalinowych, do produkcji energii elektrycznej i ciepła lub może zostać wykorzystany w syntezach chemicznych (np. Fischera i Tropscha, syntezie alkoholi)¹⁸⁾.

Zgazowanie termiczne to proces egzotermiczny, w którym przekształcane są odpady zawierające w swoim składzie chemicznym węgiel w gaz syntezowy wskutek przebiegu odpowiednich reakcji chemicznych przedstawionych w tabeli 1^{19, 20)}.

Table 1. Thermochemical reactions in the gasification process^{19, 20)}

Tabela 1. Reakcje termochemiczne w procesie zgazowania^{19, 20)}

Reakcja	Nazwa reakcji	Mechanizm
$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$	częściowe utlenianie	endotermiczny
$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	reakcja Boudouarda	endotermiczny
$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	reakcja wodno-gazowa	endotermiczny
$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	reakcja metanizacji	endotermiczny
$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	całkowite utlenianie	endotermiczny
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	utlenianie H ₂	endotermiczny
$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	reakcja przemiany woda-gaz	endotermiczny
$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	reakcja reformingu parowego	egzotermiczny

Na skład gazu syntezowego i jego jakość wpływa czas przebywania w reaktorze, rodzaj procesu zgazowania, ciśnienie, temperatura, skład surowca i typ reaktora. Czas przebywania odpadów w reaktorze odgrywa kluczową rolę w procesie zgazowania. Wydłużenie czasu przebywania pozytywnie wpływa na produkcję H₂, zwiększając także wydajność procesu²⁰⁾.

Najczęściej jako czynnik podtrzymujący proces zgazowania stosuje się powietrze, parę wodną, ditlenek węgla, tlen lub mieszaninę tych gazów²¹⁻²³⁾. W przypadku wykorzystania powietrza jako czynnika, rozcieńczenie gazu syntezowego na skutek obecności azotu w powietrzu może obniżyć wysoką wartość opałową powstałego gazu syntezowego i efektywność procesu zgazowania²⁴⁾. Wykorzystanie O₂ zwiększa koszty procesu zgazowania odpadów, pomimo zapobiegania problemom związanym z obecnością N₂. Jako tańszą i wygodniejszą alternatywę dla O₂ wykorzystuje się parę wodną jako czynnik zgazowujący. Jest tańsza niż O₂ i pozwala uniknąć problemów związanych z obecnością N₂. Ponadto zastosowanie pary wodnej zwiększa zawartość H₂ w gazie syntezowym na skutek reformingu parowo-metanowego i reakcji parowo-węglowej. Wykorzystanie CO₂ pozwala również uniknąć problemów związanych z N₂, umożliwiając jednocześnie kontrolę stosunku H₂/CO i zwiększając efekty synergiczne. Może jednak podnieść koszty operacyjne instalacji^{25, 26)}.

Technologie zgazowania stosowane w przetwarzaniu odpadów

W ostatnich dziesięcioleciach opracowano kilka typów reaktorów zgazowujących i prowadzi się wiele badań skupiających się głównie na możliwych postępach w zakresie generatorów gazu.

Obecnie dostępne na rynku technologie zgazowania są klasyfikowane ze względu na różne parametry, w tym sposób dostarczania ciepła, zastosowany czynnik zgazowujący i typ reaktora²⁷⁾. Jeśli chodzi o konstrukcję reaktora, zazwyczaj dzieli się one na trzy główne kategorie: ze złożem stałym (współprądowe, przeciwprądowe i krzyżowe), ze złożem fluidalnym (bąbelkowe i cyrkulacyjne) oraz ze złożem fluidalnym porywanym^{28–30)}, a oprócz nich są też reaktory z piecem obrotowym i plazmą. Wszystkie te reaktory mają zalety i wady, a wybór zależy od skali działania, charakterystyki surowca i pożądanego zastosowania wytwarzanego gazu³¹⁾.

Reaktory ze złożem stałym

Gazyfikatory ze stałym złożem są najprostszą technologią procesu zgazowania. Można w nich stosować różne czynniki zgazowujące, a zgazowanie zachodzi w czasie 900–1800 s, pod wysokim ciśnieniem³²⁾. Układy ze złożem stałym mają przestrzeń w kształcie cylindra, do której surowiec wprowadzany jest od góry reaktora, zaś czynnik zgazowujący podawany jest od dołu. Reaktor pracuje pod wysokim ciśnieniem 1–100 bar i w temp. 500–1200°C, co wpływa na wysoką konwersję węgla zawartego w odpadach³⁰⁾.

Reaktory z generatorami gazu ze złożem nieruchomym obejmują konfiguracje z prądem wstępującym i opadającym (rys. 1). Różne konfiguracje są związa-

ne z podawaniem surowca i czynnika zgazowującego. W reaktorze z prądem wznoszącym surowiec wprowadza się do górnej części generatora, natomiast czynnik zgazowujący wprowadza się z boku lub od dołu reaktora. Produkcja gazu syntezowego odbywa się wzdłuż reaktora, wyjście wytworzonego gazu znajduje się w jego górnej części, a popiół osadza się na dnie reaktora. W reaktorze z prądem zstępującym surowiec wprowadza się w górnej części reaktora, a czynnik zgazowujący wchodzi z boku lub od góry reaktora; w ten sposób gaz syntezowy wytwarzany jest na dnie reaktora. W kilku badaniach uznano, że reaktory ze złożem stałym można stosować z różnymi rodzajami odpadów o wysokim współczynniku konwersji węgla i małej emisji popiołu. Jednakże tego typu reaktory nie są zwykle stosowane na dużą skalę ze względu na wymaganą małą zawartość wilgoci w surowcu, co jest jednym z ograniczeń stosowania wybranych odpadów^{28, 30)}.

Reaktory ze złożem fluidalnym

W tego typu gazyfikatory do reaktora wprowadzany jest wsad, a następnie wtryskiwany jest czynnik fluidyzacyjny wraz z piaskiem, pracujący w temp. 800–900°C. Reaktory te mogą utrzymywać temp. 700–1000°C³¹⁾. Reakcja odpadów stałych może zająć więcej czasu, co powoduje zwiększone przenoszenie ciepła i wyższą konwersję węgla. Gazyfikatory ze złożem fluidalnym mają dwie główne konfiguracje: pęcherzykowe złożo fluidalne i krążące złożo fluidalne^{32, 33)}.

Gazyfikatory z pęcherzykowym złożem fluidalnym są zaprojektowane do pracy w warunkach małej prędkości gazu 1–3 m/s i pracy w temp. 800–1000°C. Cząstki są przenoszone wraz z gazem i rozdzielane przez cyklon; stąd surowy gaz syntezowy przepływa do kolejnego etapu, natomiast cząstki opadają na dno reaktora³⁴⁾.

W gazyfikatory z obiegowym złożem fluidalnym zgazowanie odbywa się w dwóch etapach. W pierwszym etapie w komorze z bulgoczącym złożem fluidalnym, reagującym z odpadami stałymi, wytwarzany jest gaz syntezowy. W drugim etapie wprowadza się większą prędkość gazu, zwykle 3–10 m/s, w celu przeciągnięcia ciała stałego. Wreszcie cyklon umożliwia oddzielenie cząstek stałych i ich cyrkulację w komorze złoża fluidalnego. Gazyfikatory ze złożem fluidalnym są szeroko stosowane na dużą skalę do odpadów stałych ze względu na ich dobrą wydajność³⁵⁾.

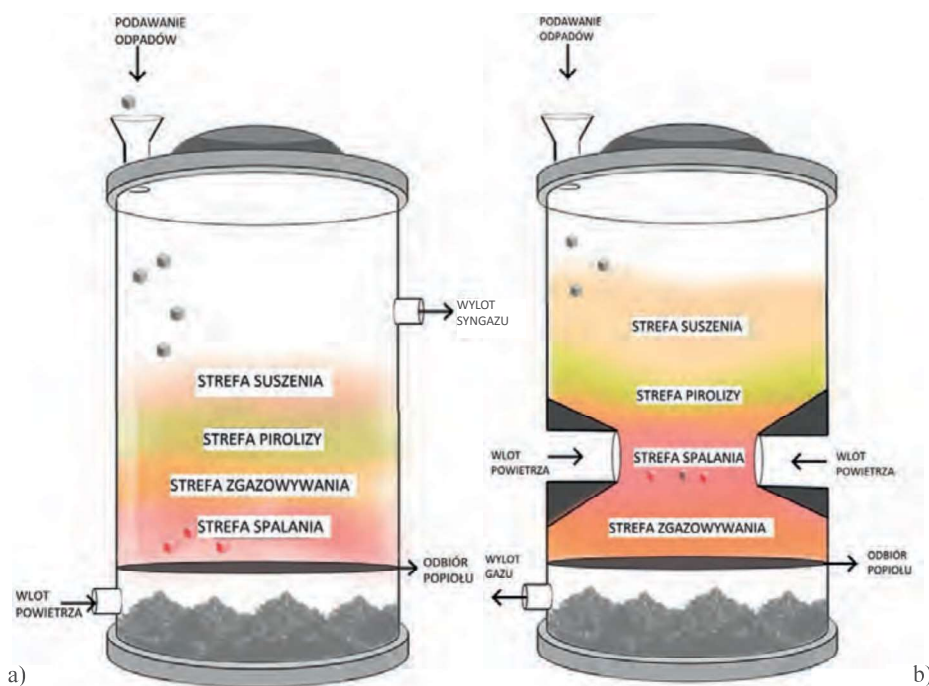


Fig. 1. Fixed bed gasifiers: a) counter-current reactor, b) co-current reactor^{28, 30)}

Rys. 1. Gazyfikatory ze stałym złożem: a) reaktor przeciwprądowy, b) reaktor współprądowy^{28, 30)}

Jednym z najważniejszych obecnie zastosowań zgazowania odpadów jest produkcja energii. Efektywność energetyczna jest dobrym wskaźnikiem wydajności i może pomóc w określeniu rodzaju reaktora, który należy uwzględnić w przypadku danego rodzaju odpadów. Wskaźnik ten różni się w zależności od reaktora zgazowania i zależy od kilku parametrów, takich jak skład surowca, temperatura zgazowania, czas przebywania odpadów w reaktorze oraz właściwości reaktorów. Zawartość energii wytwarzana przez reaktory ze złożem fluidalnym waha się zazwyczaj w zakresie 3,7–8,4 MJ/Nm³ dla bulgoczącego złoża fluidalnego i 4,5–13 MJ/Nm³ dla krążącego złoża fluidalnego³⁶). Ponieważ gaz z tych reaktorów zawiera również duże ilości tlenu węgla (25–30%) i wodoru (35–40%), należy oczekiwać, że reaktory te idealnie nadają się do zastosowania w przemyśle paliwowym oraz do wytwarzania wodoru.

Reaktory plazmowe

Zgazowanie plazmowe jest stosunkowo nową technologią, która wykorzystuje elektrycznie zjonizowany za pomocą palników plazmowych gaz o temp. ok. 10 000°C, pod ciśnieniem 1–3 bar, dzięki czemu możliwe jest otrzymanie z surowca gazu syntezowego. W reaktorze plazmowym surowiec wprowadzany jest od góry komory, natomiast czynnik zgazowujący wprowadzany jest z boku reaktora. Palniki plazmowe stanowią istotę tego rozwiązania i montowane są bezpośrednio w reaktorze. Schemat tego typu reaktora przedstawiono na rys. 2³⁷). Materiały nieorganiczne przekształcają się w obojętny i szklisty

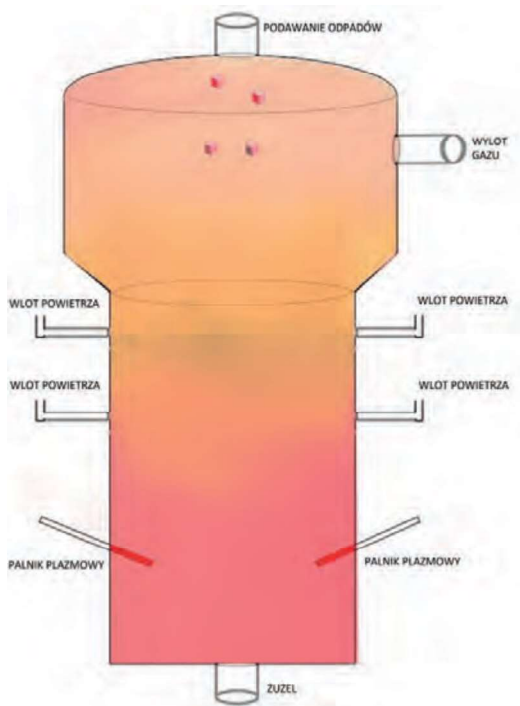


Fig. 2. Gasifier with a plasma burner³⁷

Rys. 2. Gazyfikator z palnikiem plazmowym³⁷

żużel, podczas gdy bardzo wysokie temperatury palnika plazmowego mogą rozkładać materiały organiczne, uzyskując czysty gaz syntezowy. Zastosowanie wysokiej temperatury może zwiększyć koszty operacyjne reaktora³⁰). Reaktor plazmowy wymaga znacznej ilości energii elektrycznej, w przybliżeniu 1200–2500 MJ/t surowca, co jest istotną wadą z punktu widzenia komercjalizacji technologii³⁵). Niemniej jednak zgazowanie plazmowe wdrożono w kilku pilotażowych zakładach przetwarzania odpadów na energię, z zachowaniem wyzwań ekonomicznych i technicznych tego typu rozwiązania^{36, 37}).

Inne rozwiązania konstrukcyjne reaktorów

Reaktor z piecem obrotowym zawiera stalową komorę o cylindrycznym kształcie, która obraca się z małymi prędkościami obrotowymi, a temperatura robocza w reaktorze wynosi 300–600°C. Reaktor z piecem obrotowym pochylony jest o kilka stopni w dół pomiędzy wlotem surowca a wylotem pozostałości z procesu spalania, jakim jest popiół denny. Taka konstrukcja pozwala na przejście odpadu wzdłuż całego reaktora i tym samym całkowite poddanie odpadu procesowi zgazowania.

Jednym z najnowszych rozwiązań jest wprowadzenie do reaktora dodatkowo wody w stanie nadkrytycznym. Technologia ta jest badana szczególnie w kontekście neutralności węglowej procesów zgazowywania i pozwala na wydajny sposób przekształcania odpadów organicznych w gaz o wysokiej zawartości H₂ i CO₂. Otrzymany CO₂ można wykorzystać do produkcji paliwa węglowodorowego³⁸). Zaletami tej technologii są: szybkość zachodzących w procesie reakcji, duża prędkość przepływu gazu i produkcja czystego gazu syntezowego^{38–42}).

Kolejną bardzo obiecującą technologią jest wysokotemperaturowe zgazowanie z wykorzystaniem pary wodnej. Proces ten wymaga zewnętrznego źródła ciepła i wykorzystuje parę o bardzo wysokiej temperaturze (ok. 1000°C) jako czynnik zgazowujący w środowisku beztlenowym, w celu całkowitego rozkładu surowca⁴³). Zgodnie z oczekiwaniami przy zastosowaniu pary o temp. 1000°C w składzie gazu syntezowego dominuje wodór⁴³). Wykorzystanie tej technologii możliwe jest w procesie zgazowania surowców, takich jak drewno, tworzywa sztuczne, guma i odpady komunalne⁴⁴).

W tabeli 2 przedstawiono porównanie wydajności różnych reaktorów wykorzystujących odpady komunalne jako surowiec pod względem składu gazu syntezowego, małej wartości opałowej (LHV) i stężenia smoły^{45–48}). Zgazowanie plazmowe charakteryzuje się większą efektywnością energetyczną w porównaniu z gazyfikatorem ze złożem fluidalnym. Patrząc na aspekt efektywności energetycznej, reaktory ze złożem fluidalnym wypadają dobrze pod względem zawartości energii w porównaniu z reaktorami z obiegowym złożem fluidalnym i reaktorami ze złożem stałym.

Table 2. Performance of various gasification reactors⁴⁵⁻⁴⁸⁾

Tabela 2. Wydajność różnych reaktorów zgazowania⁴⁵⁻⁴⁸⁾

Rodzaj reaktora	Rodzaj odpadu	Skład gazu, % obj.					Stężenie smoły	Mała wartość opałowa, LHV, MJ/Nm ³
		CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	N ₂		
Przeciwnyprądowy ze stałym złożem	odpady komunalne (atmosfera parowa)	11–23	21–38	34–54	1–10	-	0–8%	-
Współprądowy ze stałym złożem	odpady stałe zmieszane komunalne SRF	13–14	13–15	10–15	2–3	53–60	67–140 g/m ³	4–5
Pęcherzykowe złożo fluidalne	odpady zmieszane SRF (80% tworzyw sztucznych, 20% celulozy)	6,6	6,0	6	6,5	64	34 g/Nm ³	7,5
Cyrkulacyjne złożo fluidalne	komunalne	15–19	17–18	7–10	3	-	11–15 g/Nm ³	4,5
Piec obrotowy	odpady stałe RDF (atmosfera parowa)	2–17	20–21	59–66	3–6	-	-	15
Plazma	odpady stałe RDF	27–46	4–18	26–52	2–4	-	132–543 mg/m ³	9–11

Zalety i wady różnych technologii zgazowania odpadów

W tabeli 3 przedstawiono zalety i wady różnych reaktorów zgazowujących pod względem wydajności, produkcji energii, perspektyw środowiskowych i ekonomicznych⁴⁹⁻⁵²⁾.

Układy ze złożem stałym charakteryzują się niskimi kosztami inwestycyjnymi, ale ze względu na konieczność wstępnej obróbki surowca i problemy z przegrzaniem reaktora zgazowanie ze złożem stałym znajduje zastosowanie przy przetwarzaniu odpadów, gdzie nie jest wymagana duża wydajność⁴⁸⁾. Z kolei reaktory ze

Table 3. Advantages and disadvantages of various gasification reactors⁴⁹⁻⁵²⁾

Tabela 3. Zalety i wady różnych reaktorów zgazowujących⁴⁹⁻⁵²⁾

Reaktor	Wymogi technologiczne	Zalety	Wady	
Stały ruszt	Przeciwnyprądowy	zawartość wilgoci < 50%; gęstość nasypowa > 400 kg/m ³ ; zawartość popiołu < 15% s.m.	wysoka sprawność cieplna; wyprodukowany syngaz może być wykorzystywany do bezpośredniego spalania	wyprodukowany syngaz zawiera smołę, olej, fenole i amoniak (wymaga separacji i procesu oczyszczania)
	Współprądowy	zawartość wilgoci < 20%; gęstość nasypowa > 500 kg/m ³ ; zawartość popiołu < 5% s.m.	łatwy w produkcji i obsłudze; mała zawartość smoły w syngazie; małe zużycie katalizatora	nadaje się tylko do surowców o małej zawartości wilgoci; ograniczenia związane z wielkością surowca; duża zawartość pyłu w wytworzonym syngazie
Fluidyzacyjny	Pęcherzykowy	zawartość wilgoci < 55%; gęstość nasypowa > 100 kg/m ³ ; zawartość popiołu < 25% s.m.	duże szybkości wymiany ciepła i masy; doskonały kontakt gaz-ciało stałe; dobra kontrola temperatury; możliwość obróbki katalitycznej odpadów w złożu; dopuszczalna jest różna zawartość wilgoci w odpadzie	wysokie koszty inwestycji; ograniczenia wielkości cząstek zarówno w złożu, jak i nadawie; problemy z defluidyzacją i porywaniem nieprzereagowanego materiału; mała szybkość dyfuzji tlenu zmniejszająca wydajność procesu zgazowania
	Cyrkulacyjny	zawartość wilgoci < 55%; gęstość nasypowa > 100 kg/m ³ ; zawartość popiołu < 25% s.m.	umożliwiają uzyskanie wysokiej konwersji i niskich zawartości smoły; można stosować różne rozmiary cząstek	spadek ciśnienia jest większy niż w złożu pęcherzykowym; obróbka katalityczna w złożu jest prawie niemożliwa; duże zapotrzebowanie energii dla wentylatorów (dla powietrza fluidyzującego); konieczność dodania stałego osprzętu do separacji i zawrotów pozostałości
Piec obrotowy	nie ma problemu z zawartością wilgoci; gęstość nasypowa > 100 kg/m ³ ; zawartość popiołu < 40% s.m.	brak problemów z charakterystyką odpadów (elastyczna zawartość wilgoci i wielkość surowca); niski koszt inwestycji i prosta obsługa	problemy z uruchamianiem i kontrolowaniem temperatury; mała wydajność energetyczna i duża ilość pozostałości	
Plazma	nie ma problemu z zawartością wilgoci; gęstość nasypowa > 100 kg/m ³ ; nie ma problemu z zawartością popiołu	stosowanie różnego rodzaju surowców bez konieczności wstępnego przetwarzania i obróbki wstępnej; osiąga się wysoką temperaturę, co sprzyja prawie całkowitemu rozkładowi związków smołowych; znacząco mniejsza emisja zanieczyszczeń w porównaniu z innymi rozwiązaniami	konieczność utrzymywania wysokiej temperatury podczas procesu zgazowania zwiększa koszty operacyjne reaktora; wymaga bardzo dużej ilości energii elektrycznej w układzie; problemy z bezpieczeństwem obsługi	

złożem fluidalnym wytwarzają gaz syntezowy o wysokich parametrach jakościowych dzięki elastyczności składu stosowanych surowców i szybkiemu nagrzewaniu w reaktorze, co sprzyja szybkości zachodzących reakcji w procesie zgazowywania. Reaktory ze złożem fluidalnym zalecane są przede wszystkim do układów wielkoskalowych⁵²). Jeśli chodzi o reaktory ze złożem ruchomym, to charakteryzują się one wysoką wydajnością i małą ilością powstającego żużla oraz wysokim współczynnikiem konwersji węgla. Technologia ta nadaje się jednak tylko do przetwarzania wybranych rodzajów odpadów ze względu na krótki czas przebywania ich w reaktorze oraz wysokie wymagania związane z wielkością surowca wprowadzanego do reaktora. Z kolei w przypadku reaktorów z łukiem plazmowym można łatwo nimi sterować, a wysoka jakość gazu syntezowego i niewielka ilość pozostałości po procesie to ogromne zalety tego typu reaktorów. Technologia zgazowania plazmowego jest najdroższym rozwiązaniem ze względu na koszt procesu operacyjnego; jednak może stanowić odpowiednią technologię dla wielu różnych, trudnych do przetwarzania odpadów.

Istnieje wiele badań procesu zgazowania w reaktorach ze złożem stałym i fluidalnym na szerokiej gamie odpadów, przeprowadzanych w różnych ośrodkach badawczych na świecie. Jak się okazuje, każda z tych technologii ma swoje ograniczenia i nie może być stosowana jako uniwersalna dla wszystkich rodzajów odpadów. Na przykład mała zawartość węgla w odpadach utrudnia przebieg procesu zgazowania w reaktorach współprądowych i przeciuprądowych ze złożem stałym. Z kolei trudności w osiągnięciu odpowiedniej temperatury w procesie dla niektórych rodzajów przetwarzanych odpadów, a także ich lepkość (zwłaszcza odpadów zawierających tworzywa sztuczne) utrudniają stosowanie pieców obrotowych jako reaktorów. Zastosowanie reaktorów ze złożem fluidalnym pozwala na wyeliminowanie wielu problemów związanych z parametrami fizyczno-chemicznymi odpadów, dlatego też znajdują one coraz szersze zastosowanie w procesie ich zgazowania⁵³).

W pracach, w których porównano gazyfikatory ze złożem stałym i ze złożem fluidalnym stwierdzono, że gazyfikatory ze złożem fluidalnym zapewniały dobre mieszanie i dobry kontakt gaz-ciało stałe, co zwiększało szybkość reakcji i efektywność konwersji. Dodatkowo dzięki zastosowaniu materiału złoża jako nośnika ciepła i katalizatora uzyskano mniejsze stężenie smoły w produkcie gazowym, co poprawiło jakość gazu. Efektywne właściwości wymiany ciepła i masy w reaktorze ze złożem fluidalnym umożliwiły wykorzystanie odpadów o różnym składzie i wartości opałowej⁵³). Reaktory ze złożem stałym mają wady związane z wytwarzaniem dużych ilości smoły i węgla, które wynikają z wymiany masy oraz słabej i nierównomiernej wymiany ciepła w procesie zgazowywania. Wymaga się więc, aby surowiec był jak najbardziej jednolity⁵⁴).

Podsumowanie

Zgazowanie to bardzo obiecująca i już skomercjalizowana technologia, gotowa do wykorzystania na większą skalę. Rynek zgazowania odpadów kopalnych, biomasy i odpadów komunalnych wyceniono w 2019 r. na 479 mld dolarów i przewiduje się, że do 2028 r. osiągnie on wartość 901 mld dolarów⁵⁵). W 2020 r. rynek gazu syntezowego szacowano na 245 557 MWth, a do 2025 r. ma osiągnąć 406 860 MWth⁵⁶). Obecnie udział biomasy i odpadów na tym dobrze rozwiniętym rynku ogranicza się do kilku procent⁵⁵).

Europa jest obecnie regionem, który dominuje na rynku przetwarzania biomasy i innych odpadów, co wynika z dużej dostępności tego surowca, rosnących obaw o środowisko, wsparcia rządowego w postaci różnego rodzaju grantów i inicjatyw lokalnych, przepisów prawnych wspomagających rozwój technologii przetwarzania odpadów i ich komercjalizacji w celu ograniczenia ich składowania na wysypiskach oraz zminimalizowaniu wpływu zawartych w nich zanieczyszczeń na wody gruntowe oraz powietrze⁵⁷).

Z punktu widzenia zastosowania gazu syntezowego oczekuje się, że do 2025 r. liderem światowego rynku zgazowania odpadów będzie segment przemysłu chemicznego, taki jak produkcja amoniaku i metanolu⁵⁸). Ekonomia wytwarzania bioproduktów odnawialnych w wyniku zgazowania odpadów musi stać się znacznie bardziej atrakcyjna niż energia elektryczna i kogeneracja. Tworzy to nowy łańcuch wartości, przyczyniając się do realizacji celów gospodarki o obiegu zamkniętym i zrównoważonego rozwoju i nie konkurując z technologiami o ugruntowanej już pozycji na rynku przetwarzania odpadów. Ze względu na rosnącą wrażliwość środowiskową związaną z wytwarzaniem czystej energii, głównym celem produkcji gazu syntezowego jest jego wykorzystanie właśnie do produkcji czystej energii elektrycznej⁵⁸).

Przedstawione technologie mają swoje zalety, ale także i ograniczenia, a wybór konkretnej technologii zależy od kilku czynników, takich jak skala działania, charakterystyka przetwarzanego odpadu i zastosowanie wytworzonego gazu syntezowego. Przewiduje się, że odpady z kolejnymi latami będą stawały się coraz ważniejszym źródłem paliw niskoemisyjnych i do 2040 r. będą odpowiadać za ponad jedną czwartą zapotrzebowania na energię odnawialną.

Otrzymano: 16-07-2024

LITERATURA

- [1] Eurostat Municipal Waste Residues, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Municipal_waste_statistics, dostęp 5.10.2022 r.
- [2] M. Banaś, *Przem. Chem.* 2018, **97**, nr 9, 1453.
- [3] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/850 z dnia 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 1999/31/WE w sprawie składowania odpadów, *Dz.U. UE L* 150/100.
- [4] G. Ozbay, M. Jones, M. Gadde, S. Isah, T. Attarwala, *J. Environ. Public Health* 2021, 6921607.

- [5] M. Banaś, T. Pająk, J. Bator, W. Wróbel, J. Ciuła, *Energies* 2024, **17**, nr 10, 2390.
- [6] J. Mukawa, T. Pająk, T. Rzepecki, M. Banaś, *Energies* 2022, **15**, nr 14, 5255.
- [7] J. Ciuła, I. Wiewiórska, M. Banaś, T. Pająk, P. Szewczyk, *Energies* 2023, **16**, nr 9, 3910.
- [8] Y.V. Fan, J.J. Klemeš, C.T. Lee, S. Perry, *J. Environ. Manag.* 2018, **223**, 888.
- [9] Q. Li, A. Faramarzi, S. Zhang, Y. Wang, X. Hu, M. Gholizadeh, *Energy Convers. Manag.* 2020, **226**, 113525.
- [10] Z. Hameed, M. Aslam, Z. Khan, K. Maqsood, A.E. Atabani, M. Ghauri, S.M.S. Khurram, M. Rehan, A.-S. Nizami, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021, **136**, 110375.
- [11] S. Yi, Y.-C. Jang, A.K. An, *J. Clean. Prod.* 2018, **176**, 503.
- [12] H.M. Mahmudul, M.G. Rasul, D. Akbar, R. Narayanan, M. Mofijur, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2022, **166**, 112577.
- [13] H.K. Jeswani, A. Azapagic, *Waste Manag.* 2016, **50**, 346.
- [14] M. Ram, J.C. Osorio-Aravena, A. Aghahosseini, D. Bogdanov, C. Breyer, *Waste Manag.* 2021, **238**, 121690.
- [15] Y. Zhang, Y. Cui, P. Chen, S. Liu, N. Zhou, K. Ding, L. Fan, P. Peng, M. Min, Y. Cheng i in., [w:] *Sustainable resource recovery and zero waste approaches* (red. M. Taherzadeh, K. Bolton, J. Wong, A. Pandey), Elsevier, Amsterdam 2019, 193.
- [16] O. Alves, L. Calado, R.M. Panizio, M. Gonçalves, E. Monteiro, P. Brito, *Waste Manag.* 2021, **131**, 148.
- [17] S. Mishra, R.K Upadhyay, *Mater. Sci. Energy Technol.* 2021, **4**, 329.
- [18] P. Zhai, Y. Li, M. Wang, J. Liu, Z. Cao, J. Zhang, Y. Xu, X. Liu, Y.-W. Li, Q. Zhu i in., *Chem* 2021, **7**, nr 11, 3027.
- [19] C. Xu, B. Liao, S. Pang, L. Nazari, N. Mahmood, S.M.S.H.K. Tushar, A. Dutta, M.B. Ray, [w:] *Comprehensive energy systems* (red. I. Dincer), Elsevier, Amsterdam 2018, 770.
- [20] F. Gallucci, R. Liberatore, L. Sapegno, E. Volponi, P. Venturini, F. Rispoli, E. Paris, M. Carnevale, A. Colantoni, *Energies* 2019, **13**, 102.
- [21] A. Kumar, D. Jones, M. Hanna, *Energies* 2009, **2**, 556.
- [22] N.V. Raibhole, S.N. Sapali, *Adv. Mater. Res.* 2012, **622-623**, 633.
- [23] P. Basu, *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction*, Elsevier, Amsterdam 2018, 211.
- [24] A.M. Parvez, M.T. Afzal, T.G. Victor Hebb, M. Schmid, *J. CO2 Util.* 2020, **40**, 101217.
- [25] D. Mukherjee, S.-E. Park, B.M. Reddy, *J. CO2 Util.* 2016, **16**, 301.
- [26] S. Heidenreich, M. Müller, P.U. Foscolo, *Advanced biomass gasification*, Elsevier, Amsterdam 2016.
- [27] U. Lee, J.N. Chung, H.A. Ingley, *Energy Fuels* 2014, **28**, 4573.
- [28] A. Ramos, E. Monteiro, V. Silva, A. Rouboa, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, **81**, 380.
- [29] A. Chanthakett, M.T. Arif, M.M.K. Khan, A.M.T. Oo, *J. Environ. Manag.* 2021, **291**, 112661.
- [30] D.T. Pio, L.A.C. Tarelho, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021, **145**, 111108.
- [31] M. Materazzi, P. Lettieri, L. Mazzei, R. Taylor, C. Chapman, *Fuel* 2013, **108**, 356.
- [32] B. Buragohain, P. Mahanta, V.S. Moholkar, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2010, **14**, 73.
- [33] J.A. Ruiz, M.C. Juárez, M.P. Morales, P. Muñoz, M.A. Mendivil, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, **18**, 174.
- [34] A. Tremel, D. Becherer, S. Fendt, M. Gaderer, H. Spliethoff, *Energy Convers. Manag.* 2013, **69**, 95.
- [35] L. Mazzoni, I. Janajreh, S. Elagroudy, C. Ghenai, *Energy* 2020, **196**, 117001.
- [36] A. Molino, P. Iovane, A. Donatelli, G. Braccioia, S. Chianese, D. Musmarra, *Chem. Eng. Trans.* 2013, **32**, 337.
- [37] Z. Ou, L. Guo, C. Chi, J. Zhao, H. Jin, D. Thévenin, *Fuel* 2022, **329**, 125474.
- [38] T. Wang, J. Xu, X. Liu, M. He, *J. CO2 Util.* 2022, **66**, 102248.
- [39] Y. Wang, C. Ren, S. Guo, S. Liu, M. Du, Y. Chen, L. Guo, *Energy* 2023, **263**, 125694.
- [40] J. Chen, L. Fu, M. Tian, S. Kang, E. Jiaqiang, *Energy* 2022, **261**, 125104.
- [41] J. Chen, Q. Wang, Z. Xu, E. Jiaqiang, E. Leng, F. Zhang, G. Liao, *Energy Convers. Manag.* 2021, **237**, 114122.
- [42] N. Mazaheri, A.H. Akbarzadeh, E. Madadian, M. Lefsrud, *Energy Convers. Manag.* 2019, **183**, 671.
- [43] D.T. Pio, H.G.M.F. Gomes, L.A.C. Tarelho, A.C.M. Vilas-Boas, M.A.A. Matos, F.S.M.S. Lemos, *Renew. Energy* 2022, **181**, 1223.
- [44] S. Luo, Y. Zhou, C. Yi, *Energy* 2012, **44**, 391.
- [45] G. Vonk, B. Piriou, P. Felipe Dos Santos, D. Wolbert, G. Vaitilingom, *Waste Manag.* 2019, **85**, 106.
- [46] U. Arena, F. Di Gregorio, *Waste Manag.* 2016, **50**, 86.
- [47] M. Thamavithya, A. Dutta, *Fuel Process. Technol.* 2008, **89**, 949.
- [48] N. Agon, M. Hrabovský, O. Chumak, M. Hlína, V. Kopecký, A. Mašláni, A. Bosmans, L. Helsen, S. Skoblja, G. Van Oost i in., *Waste Manag.* 2016, **47**, 246.
- [49] R. Warnecke, *Biomass Bioenergy* 2000, **18**, 489.
- [50] G. Lopez, M. Artetxe, M. Amutio, J. Alvarez, J. Bilbao, M. Olazar, *Energy Rev.* 2018, **82**, 576.
- [51] Z.A.B.Z. Alauddin, P. Lahijani, M. Mohammadi, A.R. Mohamed, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2010, **14**, 2852.
- [52] M.L. Valderrama Rios, A.M. González, E.E.S. Lora, O.A. Almazán del Olmo, *Biomass Bioenergy* 2018, **108**, 345.
- [53] Y.A. Situmorang, Z. Zhao, A. Yoshida, A. Abudula, G. Guan, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020, **117**, 109486.
- [54] Gasification. A sustainable technology for circular economies. Scaling up to reach net-zero by 2050, <https://www.europeanbiogas.eu/new-paper-proves-potential-of-gasification-to-scale-up-and-support-net-zero-by-2050>, dostęp 5.10.2022 r.
- [55] <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/syngas-market-1178.html>, dostęp 5.10.2022 r.
- [56] <https://www.fortunebusinessinsights.com/gasification-market-103487>, dostęp 5.10.2022 r.
- [57] D. Porshnov, *WIREs Energy Environ.* 2022, **11**, e421.
- [58] Y.H. Chan, S.N.F. Syed Abdul Rahman, H.M. Lahuri, A. Khalid, *Environ. Pollut.* 2021, 278, 116843.