

OCENA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA PALIWA RDF NA CELE ENERGETYCZNE

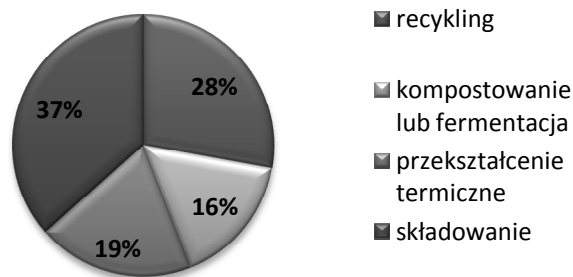
Przemysław Rajca, Monika Zajemska

Słowa kluczowe: odpady komunalne, paliwo RDF, energetyka

Streszczenie. Zgodnie z dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2006/12/WE z dnia 5 kwietnia 2006 r. o odpadach oraz polskim prawodawstwem, składowanie odpadów jest ostatnią i najmniej pożądaną formą ich zagospodarowania. Dodatkowo od 1 stycznia 2016 r. obowiązuje w Polsce zakaz składowania odpadów o wartości opałowej przekraczającej 6 MJ/kg. Wspomniane przesłanki zachęcają do szerszego wykorzystywania odpadów na cele energetyczne. Obecnie odpowiednio przygotowane odpady (RDF) znajdują zastosowanie jako paliwo w przemyśle cementowym. Na uwagę zasługują innowacyjne metody wykorzystania odpadów w ciepłownictwie. Wprowadzanie coraz bardziej restrykcyjnych wymagań emisyjnych w UE, wymusza na państwach członkowskich konieczność opracowywania nowoczesnych instalacji do odzysku energii. Ze względu na powyższe w artykule przedstawiono możliwości zagospodarowania odpadów komunalnych, na przykładzie paliwa RDF, ze szczególnym uwzględnieniem instalacji do odzysku energii z odpadów oraz metod jego wykorzystania, a także wpływu spalania tego paliwa na środowisko. Ponadto, skupiono się na ocenie zasadności wykorzystania paliwa RDF na cele energetyczne, umożliwiającego ograniczenie ilości składowanych odpadów oraz dywersyfikację źródeł paliw i energii.

1. WSTĘP

Szybkie tempo rozwoju cywilizacji przyczynia się do wzrostu konsumpcji, a tym samym do zwiększenia ilości powstających odpadów przemysłowych i komunalnych. W Polsce w 2016 r. wytworzono niemal 140 tys. ton odpadów, z czego ponad 11,5 tys. ton stanowiły odpady komunalne. Na rys. 1 przedstawiono formy zagospodarowania odpadów komunalnych w roku 2016 [12,16].



Rys. 1. Formy zagospodarowania odpadów komunalnych w 2016 r. [12]

Jak można zaobserwować na rys.1, największy udział w zagospodarowaniu odpadów w 2016 r. miało składowanie (37%) oraz kolejno recykling (28%), przekształcenie termiczne (19%), natomiast najmniejszy udział w wykorzystaniu odpadów komunalnych przypadł kompostowaniu lub fermentacji (16%). W porównaniu do roku 2015, można stwierdzić zmniejszenie się ilości składowanych odpadów (o ok. 7,4%), na rzecz wzrostu pozostałych form zagospodarowania odpadów, odpowiednio recykling (o ok. 1,7%), przekształcenie termiczne (o ok. 5,8%), natomiast udział kompostowania lub fermentacji pozostał na zbliżonym poziomie. Te optymistyczne dane pokazują nowe trendy w polskiej gospodarce odpadami, która dostosowuje się do restrykcyjnych wymagań Unii

Europejskiej i sukcesywnie ogranicza ilość składowanych odpadów [12,16,19].

Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach precyzuje hierarchię sposobów postępowania z odpadami, według której najbardziej pożądaną techniką jest zapobieganie powstawaniu odpadów, a także przygotowanie ich do ponownego wykorzystania, natomiast najmniej pożądaną jest ich składowanie. Dodatkowo ustawa o zmianie ustawy o odpadach oraz niektórych innych ustaw z 15 stycznia 2015 r. (Dz.U. z 2015 r., poz. 122) wprowadziła nowy przepis, pozwalający na wykreślenie z wojewódzkiego planu gospodarki odpadami instalacji, niespełniających wymagań ochrony środowiska. Ustawodawca sformułował również nową definicję Regionalnej Instalacji Przetwarzania Odpadów Komunalnych (RIPOK), otwierając ją na innowacyjne technologie, np. pirolizę, zgazowanie lub proces plazmowy, bez konieczności zakwalifikowania wspomnianych procesów jako termiczne przekształcanie odpadów. Powyższe poprawki mają na celu umożliwienie efektywnego uzyskania i odzysku odpadów, w tym ich recyklingu, a także sukcesywne ograniczanie ilości składowanych odpadów [16,31].

Dodatkowo istotny z punktu widzenia kształtowania gospodarki odpadami wydaje się być Komunikat Komisji Do Parlamentu Europejskiego, Rady Europy, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów „Ku gospodarce o obiegu zamkniętym: program zero odpadów dla Europy” z dnia 2.12.2015 r., przewidujący od roku 2025 zakaz składowania odpadów nadających się do recyklingu, a także od 2050 roku całkowity zakaz składowania odpadów. Planowane działania pokazują nowe trendy, kładące nacisk na zapobieganie powstawaniu odpadów oraz ich ciągłym przetwarzaniu, zarówno poprzez odzysk materiałowy, jak i energetyczny. Odno-

sząc się do tego ostatniego, w polskim prawodawstwie, w art. 14 ustawy o odpadach z dnia 14 grudnia 2012 r. o (Dz.U. z 2013 r., poz. 21 z późn. zm.), określono przesłanki pozwalające na stwierdzenie utraty statusu odpadu, takie jak:

- powszechność stosowania do konkretnych celów,
- istnienie rynku lub popytu na nie,
- spełnienie wymagań technicznych dla zastosowania do konkretnych celów oraz wymagań przepisów i norm do nich się odnoszących,
- możliwość ich zastosowania, niepowodująca negatywnych skutków dla życia i zdrowia ludzi ani środowiska,
- zgodność z przepisami europejskimi.

Wspomniane uregulowania pozwolą nie tylko na ograniczenie liczby składowanych odpadów, ale również na rozwój nowoczesnych instalacji do recyklingu oraz odzysku energetycznego odpadów. Paliwa alternatywne mogą stać się dobrym uzupełnieniem dla paliw kopalnych, przy jednoczesnym zwiększaniu poziomu ochrony środowiska [19,31].

2. CHARAKTERYSTYKA PALIWA RDF

Paliwo powstałe wskutek przekształcenia odpadów, których potencjał energetyczny jest wystarczający do uzyskania źródła energii lub których właściwości pozwalają na ich przetworzenie w produkty możliwe do energetycznego wykorzystania, określa się terminem paliwa alternatywnego lub wtórnego. Paliwo RDF (Refuse Derived Fuel) jest specyficzną odmianą wspomnianego paliwa, charakteryzującą się wysoką wartością opałową (przeciętnie 16-18 MJ/kg), a także homogenicznym rozmiarem cząstek. Produkcja paliwa RDF polega na wydzieleniu z odpadów komunalnych palnej frakcji (papieru, tworzyw sztucznych, materiałów tekstylnych, drewna, gumy) poprzez ich sortowanie, a także poddanie wielostopniowemu procesowi rozdrabniania, a następnie brykietowania. Na rys. 2 pokazano widok paliwa RDF [17].



Rys. 2. Widok paliwa RDF [24]

Zróznicowany skład komponentów tworzących paliwo RDF, na co wpływa ich zmienna wielkość, struktura, a także budowa chemiczna, przyczynia się do

powstawania trudności podczas badania właściwości fizykochemicznych wspomnianego paliwa. W tabeli 1 zestawiono wybrane parametry paliwa RDF pochodzące z różnych źródeł literaturowych.

Tabela 1.
Wybrane parametry paliwa RDF

	[5]	[21]	[11]	[10]
Wartość opałowa, MJ/ kg	17,00	21,20	15,00	19,80
Zawartość popiołu, %	11,07	10,90	16,00	3,40
Zawartość wilgoci, %	19,20	15,00	12,00	0,00 *
Zawartość węgla, %	58,84	47,10	42,00	52,00
Zawartość wodoru, %	8,21	7,10	5,00	6,60
Zawartość tlenu, %	30,71	29,40	35,00	38,00
Zawartość azotu, %	1,99	0,70	1,00	0,18
Zawartość siarki, %	0,25	0,24	0,30	<0,02
Zawartość chloru, %	0,00	0,60	0,60	0,10

*Wysuszone próbki

Jak wynika z tabeli 1, próbki odznaczały się wartością opałową mieszczącą się w przedziale 15,00 - 21,20 MJ/kg, zawartością popiołu zawierającą się w przedziale 3,40 – 16,00%, a także zawartością wilgoci nieprzekraczającą 20%. Składy elementarne zestawionych paliw RDF różniły się w zależności od pochodzenia odpadów, z których to paliwo powstało.

Z kolei zmienne, niestabilne w czasie właściwości fizykochemiczne mogą stać się przeszkodą w wykorzystaniu paliw wtórnych na cele energetyczne. W związku z tym istotne jest opracowanie skutecznych metod oceny jakości tych paliw, umożliwiających optymalizację doboru ilościowo - jakościowego paliw alternatywnych dla różnych technologii spalania. Ponadto, niezbędny aspekt przy odzysku odpadów stanowi wykorzystanie akredytowanych laboratoriów dysponujących odpowiednim zapleczem technicznym i analitycznym [19].

2.1. Wykorzystanie paliwa RDF na świecie

Sukcesywne zaostrożenie przepisów dotyczących ograniczania składowania odpadów, a także oszczędności związane z mniejszym zużyciem konwencjonalnych paliw, zaowocowały powstaniem zakładów zajmujących się odzyskiem energii z odpadów, tzw. „Waste to Energy Plants” (WtE). Proces spalania może być zasilany bezpośrednio przez odpady komunalne lub kilka rodzajów odpadów przemysłowych. Biorąc pod uwagę spalanie odpadów komunalnych, jest ono określane jako „masowe palenie” i realizowane najczęściej w zestawieniu ze spalaniem odpadów przetworzonych mechanicznie. Ma to celu

zwiększenie wartości opałowej poprzez zmniejszenie zawartości wilgoci i popiołu, a także poprawę parametrów środowiskowych (redukcję chloru i rtęci) frakcji palnej, zgodnie z wymaganiami dla produkcji paliw SRF/RDF (Solid Refuse Fuel/Refuse Derived Fuel). Warto nadmienić, że odpady mogą być spalane bez użycia paliw pomocniczych, kiedy ich wartość opałowa przekracza 5-7 MJ/kg, na co znacząco wpływa zawartość wilgoci i popiołu w odpadach. Według [13], korzystającej z doświadczeń Komilisa oraz Tannera, strefę samozapłonu określa się dla zawartości wilgoci niższej niż 50% masy, zawartości popiołu poniżej 60% oraz substancji palnej w ilości większej niż 25% masy. Biorąc pod uwagę wskazania dyrektywy 2000/76 / WE wymagającej, aby gazowe produkty spalania osiągały temperaturę 850°C (dla odpadów innych niż niebezpieczne) oraz 1100°C (w przypadku odpadów niebezpiecznych) przez co najmniej 2 sekundy, a także właściwości fizyczne odpadów, można wyznaczyć kierunki ich termicznego wykorzystania. Odpady, a w szczególności odpady komunalne zawierają w swoim składzie wiele odmiennych pod względem właściwości materiałów, różniących się rozmiarem cząstek, co w istotny sposób wpływa na wydłużenie czasu ich spalania. W związku z tym obecnie najczęściej stosowanymi komorami spalania dla odpadów są [13]:

- kotły rusztowe,
- kotły na złożu fluidalnym,
- piece obrotowe.

Wg [13] stwierdza się, że na świecie istnieje ponad 650 zakładów termicznego przekształcania odpadów, które rocznie przetwarzają około 180 mln Mg odpadów komunalnych w Unii Europejskiej, USA, Japonii, Kanadzie oraz pozostałych 30 krajach, w tym w Chinach rozwijających technologię „masowego palenia”. Dyrektywa 2008/98 / WE określiła minimalny poziom wskaźnika odzysku energii R1 dla zakładów WtE na poziomie 0,60. Ponadto, niektóre kraje europejskie, takie jak Holandia, Austria i Szwajcaria wprowadziły dodatkowe kryteria do oceny efektywności energetycznej wspomnianych zakładów, celem określenia dotacji. Wyżej wymieniony wskaźnik został poddany ocenie Europejskiej Konfederacji Zakładów do Odzysku Energii z Odpadów (CEWEP) i okazało się, że trudności ze spełnieniem wymaganego przez dyrektywę poziomu wskaźnika R1 odnotowano w zakładach zlokalizowanych w Europie Południowo-Zachodniej, produkujących wyłącznie energię elektryczną. We wspomnianych zakładach, gdzie przepustowość jest niższa niż 100 000 Mg/rok, zaledwie ok. 37,3% spełnia warunek $R1 > 0,60$. Natomiast najwyższe wyniki R1 uzyskano w dużych zakładach, o przepustowości więk-

szej niż 250 000 Mg/rok, zlokalizowanych w Europie Północnej. Spośród 314 zakładów CEWEP, 83 wytwarzały wyłącznie energię elektryczną, 47 produkowało wyłącznie ciepło oraz 184 zakłady wytwarzały jednocześnie wspomniane rodzaje energii [13].

Z kolei w Wielkiej Brytanii istnieje 25 zakładów WtE, wykorzystujących odpady komunalne, z czego 23 zakłady stosują najbardziej rozpowszechnioną technologię - spalanie na ruszcie ruchomym. Niską popularnością cieszą się technologie spalania w złożu fluidalnym oraz w piecu obrotowym (zaledwie po jednym zakładzie). Wspomniane instalacje odznaczają się przepustowością od 56 000 do 500 000 Mg odpadów komunalnych rocznie, przy efektywności (dla wartości opałowej wynoszącej ok. 10 MJ/kg) na poziomie 21-24%, wyłącznie dla produkcji energii elektrycznej, podczas gdy dla elektrociepłowni wynosi około 31%. Natomiast biorąc pod uwagę badania 110 francuskich instalacji do spopielenia odpadów stwierdzono, że 37% zakładów zajmuje się produkcją wyłącznie energii elektrycznej, o średniej wydajności 14% , a 21% zakładów wytwarza tylko energię cieplną przy uzyskaniu wydajności na poziomie 43% oraz 26% zakładów produkuje energię elektryczną i ciepło ze średnią wydajnością 33% [13].

W USA zakłady WtE zlokalizowane są w 25 stanach i zasilane 26,3 mln Mg odpadów komunalnych rocznie, co stanowi 7,8% ogólnej liczby tych odpadów. Większość instalacji powstała na wschodzie wybrzeża, co odpowiada 66% mocy wytwarzanych we wszystkich zakładach WtE w Stanach Zjednoczonych. W 65 „WtE Plants” wykorzystuje się $20,5 \times 10^6$ Mg odpadów rocznie jako spalanie masowe, natomiast w 15 zakładach zużywa się $5,71 \times 10^6$ Mg RDF/rok. Warto podkreślić, że Departament Energii Stanów Zjednoczonych klasyfikuje zakłady WtE jako instalacje przetwarzania biomasy, a tym samym uznaje je za źródło energii odnawialnej, niebędącej paliwem kopalnym. Wspomniane podejście pozwoliło na zwiększenie do 28% udziału zakładów „Waste to Energy” w produkcji odnawialnej energii elektrycznej w tym kraju, z wyłączeniem elektrowni wodnych [13].

Z kolei w Japonii, z powodu braku dostatecznej ilości miejsca do składowania odpadów, poddaje się je procesowi spalania w dużej liczbie małych zakładów. W związku z powyższym wspomniany kraj jest czołowym użytkownikiem obróbki termicznej odpadów, przetwarzając około 40 mln Mg odpadów komunalnych, przy wykorzystaniu technologii spalania w kotłach rusztowych. W Japonii około 80% odpadów komunalnych jest poddawanych spopieleniu, natomiast zaledwie 24,5% spalarni spełnia wymogi dotyczące odzysku energetycznego. Biorąc pod uwa-

gę instalacje spełniające powyższe kryteria, charakteryzują się one dość niską wydajnością wytwarzania energii (na poziomie 11,3%), wytwarzając średnio 200 kWh/Mg a dla dużych instalacji ok. 300-390 kWh/Mg. Dodatkowo produkcja energii cieplnej również utrzymuje się na niskim poziomie (średnio 0,76 kWh/Mg) i jest wykorzystywana głównie do ogrzewania basenów oraz obiektów komunalnych, a także do podgrzewania wody w obiektach użyteczności publicznej. Szerokie wykorzystanie obróbki termicznej odpadów w Japonii, nawet jeśli nie występuje odzysk energii, przyczynia się do ograniczenia wykorzystania składowisk, co stanowi istotny aspekt zarządzania odpadami komunalnymi w tym kraju. Ponadto, postępowanie z popiołami, powstałymi ze spalania odpadów komunalnych, takie jak topienie, wymagane przed ich składowaniem, wynika z surowych japońskich uregulowań dotyczących zagospodarowania odpadów. Wspomniane procesy topienia popiołów, przyczyniły się do rozwoju procesów produkcji kamionkowych pozostałości, możliwych do wykorzystania jako dodatek do procesu spalania (np. wzbogacanie tlenem), a także do obróbki w procesie zgazowania w wysokiej temperaturze. Pozwoliło to na komercjalizację wielu zakładów, zajmujących się zgazowaniem i topieniem odpadów [13].

Wzrost ilości odpadów komunalnych w Chinach wynosi średnio około 8-10% w skali roku, co przekłada się na roczną produkcję odpadów na poziomie ponad 150 mln Mg. Obecnie około 55% odpadów komunalnych jest objęte systemem gospodarki odpadami, w skład którego wchodzi: składowanie, kompostowanie i spalanie. Największy udział w zagospodarowaniu odpadów ma ich składowanie (ok. 80%), natomiast obserwuje się stopniowy wzrost ilości odpadów komunalnych poddawanych procesowi spalania. Wynika to głównie z chęci zmniejszenia ilości składowanych odpadów, a nie odzysku energii. Warto nadmienić, że w porównaniu do Europy i Ameryki Północnej, odpady komunalne mają niższą wartość opałową, przeciętnie około 5 MJ/kg, przy czym dla typowych chińskich miast wynosi ona 4 MJ/kg, natomiast dla większych miast ok. 6-7 MJ/kg. Ponadto, analizując badania Yang, stwierdzono niską wartość opałową odpadów dla sześciu chińskich miast, oscylującą w przedziale 3,75 - 5,75 MJ/kg. Spalanie odpadów o tak ubogich właściwościach energetycznych wiąże się z kilkoma problemami, do których należy zaliczyć:

- trudności z zapłonem,
- niestabilność płomienia spalania,
- występowanie niecałkowitego spalania,

- tworzenie się większych ilości zanieczyszczeń powietrza.

W celu ograniczenia wspomnianych trudności stosuje się paliwa uzupełniające, co niestety przyczynia się do zwiększenia kosztów operacyjnych. Technologia spalania odpadów, najczęściej wykorzystywaną w Chinach jest spalanie masowe realizowane w kotłach rusztowych. Średnia wartość uzysku energii elektrycznej dla masowego spalania w kotle rusztowym w Szanghaju kształtuje się na poziomie ok. 17%, natomiast wartość wydajności uzysku elektryczności, przy zastosowaniu instalacji WtE opartej na współspalaniu odpadów komunalnych z węglem w kratownicy cyrkulacyjnej kotła ze złożem fluidalnym, na poziomie 14,6%. Istnieją także przesłanki do rozproszenia zakładów zajmujących się odzyskiem energii z odpadów i rozwoju lokalnych technologii, przyczyniających się do zwiększenia wkładu w rozwój produkcji energii odnawialnej. Obecnie produkcja energii w Chinach oparta jest na węglu, natomiast wykorzystanie odpadów pozwoli na dywersyfikację źródeł paliw i energii, a także na właściwe kształtowanie gospodarki odpadami w tym kraju [13].

Mimo, iż w 2000 r. w Indiach wprowadzono regulacje dotyczące systemu zagospodarowania odpadów komunalnych, obejmuje on zaledwie 70% odpadów, przy czym dominującą formą ich zagospodarowania jest składowanie (ok. 90%). Ponadto, wymienia się także kompostowanie oraz niewielkie ilości odpadów wykorzystywanych energetycznie (spalanie RDF oraz biometanizacja). Dodatkowe utrudnienie stanowi niska kaloryczność odpadów komunalnych w Indiach, która mieści się w przedziale 3,3 – 4,2 MJ/kg. Natomiast zauważa się konieczność wybudowania zakładu do odzysku energii z odpadów, a także produkcji biogazu, co w znaczący sposób przyczyni się do poprawy warunków bytowych oraz środowiskowych, dla stale rosnących miast [13].

Australia należy do atrakcyjnych pod względem wykorzystania energii słonecznej regionów świata. W związku z tym powstało tam wiele zakładów CSP (Concentrating Solar Power). Dodatkowo chęć zachowania konkurencyjności na rynku, a także obniżenia kosztów produkcji energii zaowocowały opracowaniem technologii CSP hybrid. Technologia ta polega na połączeniu uzysku energii słonecznej z energią cieplną uzyskiwaną poprzez spalanie pozostałości leśnych, z trzciny cukrowej oraz odpadów drzewnych, a także paliwa RDF. Wspomniane przedsięwzięcie jest promowane w Australii oraz ma charakter globalny. Odnosząc się do paliwa RDF, na wyżej wspomnianym kontynencie wytwarza się je z odpadów komunalnych, komercyjnych i przemysłowych poprzez usunięcie frakcji nadającej się do recyklingu

(tworzywa sztuczne, metale), materiałów obojętnych jak szkło i cegły, a także odpadów pochodzenia organicznego (odpady ogrodowe i żywnościowe). Technologie przygotowania paliwa RDF oraz systemy do odzysku energii są sprawdzone przez wiele komercyjnych firm na całym świecie. Wspomniane paliwo ma zawartość energii na poziomie 40 – 60% oraz wysoką wartość opałową (przeciętnie 11,7 - 31,6 MJ/kg). Ponadto, frakcja RDF jest bardziej spójna niż niesortowane odpady, co wpływa na większą wydajność spalania. Zapotrzebowanie na wspomniane paliwo pozwala na utrzymanie wiodącej roli recyklingu odpadów, przy jednoczesnym ograniczaniu ilości składowanych odpadów [18].

2.2. Wybrane instalacje do odzysku energii z odpadów

W niniejszym rozdziale skupiono się na rozwiązaniach powszechnie wykorzystywanych w naszym kraju, a także wartych rozważenia w odniesieniu do przyszłości polskiej energetyki. Spalanie paliw z odpadów nie zawsze musi się wiązać z budową nowej instalacji, zwiększającej emisję gazowych zanieczyszczeń do atmosfery oraz generującej dodatkowe ilości popiołów, pyłów z urządzeń odpylających, czy też szlamów z urządzeń chemicznego oczyszczania spalin. W Polsce, a także w wielu państwach europejskich, tj. Niemcy, Holandia, Belgia, itd. wykorzystuje się spalanie paliwa RDF w piecach obrotowych cementowni jako substytut dla węgla. Tylko w 2011r. w naszym kraju ponad 40% energii dostarczały paliwa z odpadów, natomiast są w Polsce instalacje uzyskujące 50%, (a maksymalnie 80%) ciepła ze spalania paliw alternatywnych. Paliwo RDF może być współspalane z pyłem węglowym w palniku głównym pieca obrotowego oraz prekalcyntorze (palniku wtórnym podczas procesu wstępnej dekarbonizacji). Niska wartość opałowa (ok. 17 MJ/kg) wspomnianego paliwa, determinowana obecnością biomasy, powoduje ograniczenie spalania paliwa RDF w palniku głównym. Konieczne jest, aby różnica temperatur w strefie spiekania między wypalaniem materiałem, a gazami spalinowymi wynosiła $>400\text{K}$, co jest możliwe do osiągnięcia przy kaloryczności na poziomie większym niż 22 MJ/kg. Według polskich doświadczeń, paliwo alternatywne z odpadów o wartości opałowej równej 13 MJ/kg pozwala zastąpić ok. 10% pyłu węglowego, natomiast paliwo RDF odznaczające się kalorycznością na poziomie 18 MJ/kg, pozwala zastąpić już ok. 20% tradycyjnego paliwa kopalnego. Z kolei w kalcyntorze istnieją odpowiednie warunki temperaturowe do energetycznego wykorzystania paliwa RDF o niższej wartości opałowej, toteż znaczna jego część jest wykorzystywana w powyższy sposób. Głównym problemem podczas spalania paliw

z odpadów jest emisja szkodliwych dla środowiska związków: dioksyn i furanów. Wymagana przez dyrektywę 2000/76 / WE temperatura 1100°C jest utrzymywana w piecach obrotowych przez 10s, co spełnia wymagania europejskie dotyczące termicznego przekształcania odpadów i pozwala na zwiększenie roli cementowni w procesie odzysku energii z odpadów [8,21].

Gazyfikacja jest termochemicznym procesem konwersji dowolnych paliw węglowych (stałych lub ciekłych surowców) do paliwa gazowego poprzez częściowe utlenienie, za pomocą czynnika utleniającego w postaci powietrza, tlenu, pary wodnej, dwutlenku węgla lub ich mieszanin. Temperatura zgazowania jest uważana za kluczowy parametr wpływający na wydajność procesu, zapewniający równowagę między reakcjami endotermicznymi i egzotermicznymi. Zasięg reakcji egzotermicznych w istotny sposób kształtuje wartość opałową otrzymanego syngazu. Istnieje wiele odmian procesu zgazowania, co potwierdza zainteresowanie możliwościami wykorzystania wspomnianej technologii do odzysku energii z odpadów. Gazyfikacja paliwa RDF jest procesem bardziej złożonym, dlatego wielu naukowców zajmowało się jego optymalizacją, m.in. badano możliwości przekształcenia próbek RDF w czysty syngaz na skalę przemysłową. Uzyskano wysoką wydajność konwersji węgla na poziomie $>96\%$. Okazało się, że optymalna temperatura dla zgazowania paliwa alternatywnego z odpadów mieści się w przedziale $850 - 900^{\circ}\text{C}$. Produktem wspomnianego procesu jest syngaz, o wartości opałowej na poziomie $4 - 7 \text{ MJ/m}^3$ zawierający: CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , H_2O oraz śladowe ilości wyższych węglowodorów, gazy obojętne pochodzące z czynnika zgazowującego, a także zanieczyszczenia, tj. małe zwęglone cząstki, popioły lub smoły. Otrzymany gaz ze zgazowania, może być użyty do współspalania przy produkcji energii elektrycznej lub ciepła, a tym samym pozwoli to na oszczędności związane z wykorzystywaniem tradycyjnych paliw kopalnych [2,15].

Paliwo alternatywne RDF może być również wykorzystywane w procesie pirolizy, czyli endotermicznym procesie rozkładu termicznego, przy całkowitym braku środka utleniającego (lub jego silnie ograniczonym udziale), w wyniku którego powstają znaczne ilości gazowych, ciekłych i stałych produktów. Najczęściej wspomniana technologia zachodzi w temperaturze $400 - 900^{\circ}\text{C}$, a produktami są gaz pirolityczny, ciecz pirolityczna oraz stały koks, których proporcje zależą od metody pirolizy, a także dobranych parametrów procesu. Zazwyczaj gaz pirolityczny powstaje przy wykorzystaniu paliwa RDF, charaktery-

zuje się kalorycznością z przedziału 15 – 30 MJ/m³ [2,25].

W tabeli 2 zestawiono typowe warunki oraz produkty opisanych powyżej procesów odzysku energii z odpadów.

Tabela 2.

Typowe warunki oraz produkty procesów spalania, pirolizy i zgazowania [2]

	Spalanie	Piroliza	Zgazowanie
Temperatura, °C	800 - 1450	250 - 900	500 – 1800
Ciśnienie, bar	1	1	1 - 45
Atmosfera	Powietrze	Gaz obojętny	Powietrze, tlen, para wodna
λ	>1	0	<1
Produkty stałe	Popiół, żużel	Popiół, koks	Żużel, popiół
Produkty ciekłe	-	Ciecz pirolityczna	-
Produkty gazowe	CO ₂ , H ₂ O, O ₂ , N ₂	H ₂ , CO, H ₂ O, N ₂ , węglowodory	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂

Technologia pirolizy była szeroko badana przy okazji wykorzystania biomasy, natomiast dotychczas niewiele uwagi poświęcono pirolizie paliwa alternatywnego. Dlatego też, w pracy oszacowano z użyciem specjalistycznego oprogramowania skład syngazu, powstałego w procesie pirolizy paliwa RDF, w oparciu o który policzono jego wartość opałową, oceniając tym samym przydatność na cele energetyczne.

3. SYMULACJE KOMPUTEROWE TERMICZNEJ UTYLIZACJI PALIWA RDF NA PRZYKŁADZIE PIROLIZY

W ramach symulacji komputerowych obliczono skład chemiczny gazu pirolitycznego dla zadanych parametrów prowadzenia procesu. W oparciu o wyznaczone palne składniki oszacowano wartość opałową synga-

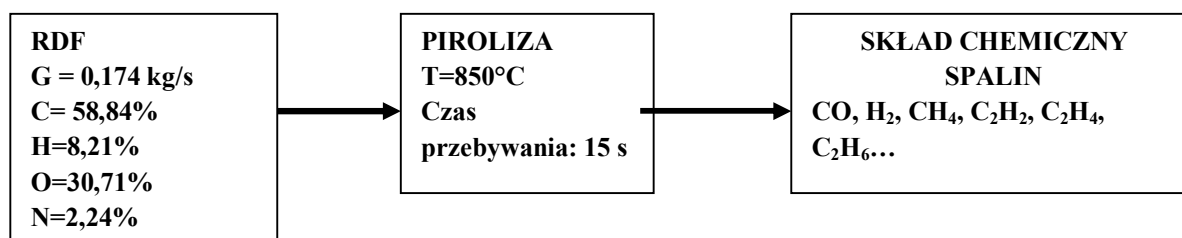
zu. Obliczenia komputerowe przeprowadzono z użyciem oprogramowania CHEMKIN-PRO. Do obliczeń zaimplementowano szczegółowy mechanizm chemiczny opracowany przez The CRECK Modelling Group [32]. Mechanizm obejmuje dane kinetyczne tj. 137 związków i 4533 reakcje chemiczne, dane termodynamiczne oraz transportowe.

Przyjęty do obliczeń mechanizm chemiczny był wielokrotnie wykorzystywany przez Ranzi, Faravelli, Frassoldati i innych do modelowania kinetyki chemicznej procesu spalania, pirolizy czy gazyfikacji różnych gatunków biomasy [1,3,4,6,7,9,22,23], a także przez Autorów niniejszego artykułu [14,20,26–30]. Na uwagę zasługuje fakt, że mechanizm był walidowany wynikami uzyskanymi w ramach eksperymentów, co zwiększa wiarygodność uzyskanych w ramach obliczeń wyników.

Do obliczeń przyjęto założenie, że spalanie przebiega w reaktorze z idealnym wymieszanym reagentów tj. Perfectly Stirred Reactor (PSR). Schemat prowadzonych obliczeń przedstawiono na rys. 3.

Do obliczeń przyjęto skład elementarny i parametry procesu z danych literaturowych. Wyniki symulacji zestawiono w tabeli 3.

Analizując otrzymane podczas obliczeń wyniki, można zaobserwować wzrost zawartości palnych składników syngazu, tj. wodoru, acetyleny oraz benzenu, a także spadek zawartości tlenku węgla, metanu, etanu oraz etenu, wraz ze wzrostem temperatury w przedziale 800 - 900°C. Natomiast zmiana czasu przebywania reagentów w reaktorze, przy jednakowych zakresach temperatur, nie wpłynęła w istotny sposób na zmiany w jego składzie. Biorąc pod uwagę zawartości palnych składników wspomnianego gazu oraz ich wartości opałowe, wyznaczono przybliżoną wartość opałową syngazu, mieszczącą się w przedziale 28,2 - 28,7 MJ/m³. Uzyskana kaloryczność gazu pirolitycznego jest znacznie wyższa od średniej wartości opałowej paliw RDF (18MJ/kg), co dodatkowo potwierdza korzyści wynikające z prowadzenia procesu pirolizy.



Rys. 3. Schemat prowadzonych obliczeń

Tabela 3.
Wyniki przeprowadzonych symulacji

	CZAS PRZEBYWANIA [s]								
	10			15			20		
TEMP. [°C]:	800	850	900	800	850	900	800	850	900
NAZWA ZWIĄZKU	% ZAWARTOŚĆ W SKŁADZIE SYNGAZU								
H ₂	14,2	16,7	20,2	13,8	16,7	20,3	13,6	16,7	20,4
CO	36,5	35,4	34,4	36,0	34,8	33,9	35,6	34,3	33,7
CH ₄	21,9	20,9	19,3	22,7	21,5	19,6	23,2	21,8	19,8
C ₂ H ₂	0,96	1,10	1,30	0,81	0,90	1,20	0,72	0,87	1,10
C ₂ H ₄	4,6	4,4	3,6	4,5	4,2	3,3	4,4	4,1	3,2
C ₂ H ₆	0,69	0,42	0,20	0,64	0,40	0,21	0,61	0,36	0,20
C ₆ H ₆	7,7	8,1	8,5	7,9	8,3	8,7	8,0	8,4	8,8
N ₂	2,2	2,2	2,1	2,2	2,2	2,1	2,2	2,2	2,1
H ₂ O	7,3	6,7	6,1	7,1	6,5	5,9	7,0	6,3	5,7
CO ₂	2,65	3,30	3,60	3,10	3,80	4,00	3,50	4,20	4,30
INNE	1,3	0,78	0,7	1,25	0,7	0,79	1,17	0,77	0,7
WARTOŚĆ OPAŁOWA SYNGAZU									
Q _{SYNGAZU} [MJ/m ³]	28,3	28,4	28,2	28,6	28,6	28,3	28,7	28,7	28,4

4. PODSUMOWANIE

Na przestrzeni ostatnich lat, w Polsce obserwuje się nowe trendy w gospodarce odpadami, kładące nacisk na sukcesywne ograniczanie ilości składowanych odpadów, przy jednoczesnym rozwijaniu instalacji do odzysku energii, tzw. „Waste to Energy” (WtE). W Unii Europejskiej dąży się stopniowo do całkowitego wyeliminowania składowania odpadów, na rzecz gospodarki w obiegu zamkniętym, opartej na recyklingu i odzysku energetycznym. Wiele krajów na świecie, np. USA, Australia, kraje UE, wykorzystuje paliwo RDF obok innych odpadów do odzysku energetycznego. Często budowa osobnej spalarni wiąże się z dodatkowymi kosztami, a także ze zwiększeniem emisji szkodliwych związków do atmosfery oraz powstawaniem dużych ilości popiołów i pyłów. W związku z powyższym, wiele krajów europejskich, w tym Polska, wykorzystuje przemysł cementowy do odzysku energetycznego paliw z odpadów w piecach obrotowych do wypalania klinkieru. Po pierwsze, takie rozwiązanie jest przyjazne dla środowiska, dzięki wysokotemperaturowemu procesowi, spełniającemu standardy dyrektywy europejskiej 2000/76 / WE. Po drugie, pozwala ono na wykorzystanie istniejącej infrastruktury cementowni do odzysku energii z odpadów, a także generuje oszczędności związane z ograniczeniem stosowania tradycyjnych paliw kopalnych. Na uwagę zasługuje również możliwość

poddawania paliwa RDF procesowi zgazowania. Instalacje przeznaczone do tego celu wykorzystuje się do termicznego przekształcenia odpadów, uzyskując palny syngaz, który, np. może zasilać instalację do suszenia odpadów komunalnych przy produkcji paliwa RDF. Proces pirolizy był szeroko badany w odniesieniu do biomasy, która stanowi składnik paliwa alternatywnego z odpadów. W związku z tym, w niniejszym artykule dokonano symulacji komputerowej termicznej utylizacji paliwa RDF na przykładzie wspomnianego procesu. Wykorzystany mechanizm chemiczny umożliwił śledzenie zmian zawartości palnych składników syngazu, wraz ze wzrostem temperatury w przedziale 800 - 900°C. Uzyskane wyniki pozwoliły na obliczenie przybliżonej wartości opałowej gazu pirolitycznego, mieszczącej się w przedziale 28,2 - 28,7 MJ/m³. Wysoka kaloryczność wspomnianego gazu zachęca do wykorzystywania go zarówno w ciepłownictwie, jak i w przemyśle hutniczym, np. do opalania pieców przepychowych, jako substytut dla gazu koksowniczego o niższej wartości opałowej (przeciętnie ok. 16,5 MJ/m³). Gaz pirolityczny może przyczynić się także do zmniejszenia zużycia gazu ziemnego, a tym samym do dywersyfikacji źródeł paliw i energii w naszym kraju. W związku z tym, warto rozwijać instalacje służące do pirolizy paliwa RDF, ograniczając ilość składowanych odpadów, jednocześnie zyskując atrakcyjne źródło energii.

LITERATURA

- [1] Barker Hemings E., Cavallotti C., Cuoci, Alberto, Faravelli T., Eliseo R.: *A Detailed Kinetic Study of Pyrolysis and Oxidation of Glycerol (Propane-1,2,3-triol)*. Combust. Sci. Technol., 2012; 1164–1178;

- [2] Bosmans A., Helsen L.: *Energy From Waste: Review of Thermochemical Technologies for Refuse Derived Fuel (RDF) Treatment*. Third Int. Symp. Energy from Biomass Waste, 2010; 8–11;
- [3] Calonaci M., Grana R., Hemings. E.B., Bozzano G., Dente M., Ranzi E.: *Comprehensive Kinetic Modeling Study of Bio-oil Formation from Fast Pyrolysis of Biomass*. Energy Fuels, 2010; 5727–5734;
- [4] Corbetta M., Frassoldati A., Bennadji H., Smith K., Serapiglia M.J., Gauthier G., Melkior T., Ranzi E., Fisher E.M.: *Pyrolysis of Centimeter-Scale Woody Biomass Particles: Kinetic Modeling and Experimental Validation*. Energy Fuels, 2014; 3884–3898;
- [5] Costa M., Massarotti N., Mauro A., Arpino F., Rocco V.: *CFD modelling of a RDF incineration plant*. Appl. Therm. Eng., 2016; 101: 710–719;
- [6] Cuoci A., Faraveli T., Frassoldati A., Grana R., Pirucci S., Ranzi E. S.S.: *Mathematical modeling of gasification and combustion of solid fuels and waste*. Chem. Eng. Trans., 2009; 18: 989–994;
- [7] Debiagi P.E.A., Gentile G., Pelucchi M., Frassoldati A., Cuoci A., Faravelli T., Ranzi E.: *Detailed kinetic mechanism of gas-phase reactions of volatiles released from biomass pyrolysis*. Biomass and Bioenergy, 2016; 93: 60–71;
- [8] Duczowska-Kądziel, A., Duda A.: *Odpady komunalne i przemysłowe alternatywnymi surowcami i paliwami w procesie produkcji cementu*. Pr. Inst. Ceram. i Mater. Bud., 2014; 172–187;
- [9] Dupont C., Chen L., Cances J., Commandre J.M., Cuoci A., Pierucci S., Ranzi E.: *Biomass pyrolysis: Kinetic modelling and experimental validation under high temperature and flash heating rate conditions*. J. Anal. Appl. Pyrolysis, 2009; 85: 260–267;
- [10] Edo M., Skoglund N., Gao Q., Persson P.E., Jansson S.: *Fate of metals and emissions of organic pollutants from torrefaction of waste wood, MSW, and RDF*. Waste Manag., 2017; 68: 646–652;
- [11] Evangelisti S., Tagliaferri C., Cliff R., Lettieri P., Taylor R., Chapman C.: *Life cycle assessment of conventional and two-stage advanced energy-from-waste technologies for municipal solid waste treatment*. J. Clean. Prod., 2015; 100: 212–223;
- [12] GUS: Departament Badań Regionalnych i Środowiska, *Ochrona środowiska 2017*. 2017;
- [13] Lombardi L., Carnevale E., Corti A.: *A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste*. Waste Manag., 2015; 37: 26–44;
- [14] Magdziarz A., Wilk M., Zajemska M.: *Modelling of pollutants concentrations from the biomass combustion process*. Chem. Process Eng. - Inz. Chem. i Proces., 2011; 32: 423–433;
- [15] Násner A.M.L., Lora E.E.S., Palacio J.C.E., Rocha M.H., Restrepo J.C., Venturini O.J., Ratner A.: *Refuse Derived Fuel (RDF) production and gasification in a pilot plant integrated with an Otto cycle ICE through Aspen plusTM modelling: Thermodynamic and economic viability*. Waste Manag., 2017; 69: 187–201;
- [16] Nowak M., Szul M.: *Possibilities for application of alternative fuels in Poland*. Arch. Waste Manag. Environ. Prot., 2016; 18: 33–44;
- [17] Osiński J., Rumianek P., Żach P.: *Automatyzacja procesów produkcyjnych w zakresie wytwarzania paliw alternatywnych*. Pomiar Autom. Robot., 2013; 195–199;
- [18] Peterseim J.H., Herr A., Miller S., White S., O'Connell D.A.: *Concentrating solar power/alternative fuel hybrid plants: Annual electricity potential and ideal areas in Australia*. Energy, 2014; 68: 698–711;
- [19] Proksa J., Zborowska I.: *Perspektywy rozwoju rynku paliw wtórnych w świetle wymagań prawnych Refused derived fuel market : growth perspectives in view of legal requirements*. INSTAL, 2017; 10–15;
- [20] Radomiak H., Bala-Litwiniak A., Zajemska M.: *Numerical prediction of the chemical composition of gas products at biomass combustion and co-combustion in a domestic boiler*. Energy and Fuels, 2016; 14: 1–8;
- [21] Rahman A., Rasul M.G., Khan M.M.K., Sharma S.: *Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process*. Fuel, 2015; 145: 84–99;
- [22] Ranzi E., Cuoci A., Faravelli T., Frassoldati A., Migliavacca G., Pierucci S., S. S.: *Chemical Kinetics of Biomass Pyrolysis*. Energy and Fuels, 2008; 4292–4300;
- [23] Ranzi E., Corbetta M., Manenti F., Pierucci S.: *Kinetic modeling of the thermal degradation and combustion of biomass*. Chem. Eng. Sci., 2014; 110: 2–12;
- [24] Sobolewski A., Bałazińska M.: *Paliwa z odpadów jako źródło energii dla klastrów energetycznych*. 2017; 1–26;
- [25] Tippayawong N., Kinorn J.: *Use of Refuse Derived Fuel as Renewable Energy Source via Pyrolysis*. Int. J. Renew. Energy, 2007; 2: 45–51;

- [26] Wilk M., Magdziarz A., Gajek M.: *Combustion and kinetic parameters estimation of torrefied pine, acacia and Miscanthusgiganteus using experimental and modelling techniques*. Bioresour. Technol., 2017; 243: 304–314;
- [27] Zajemska M.: *Theoretical and experimental analysis of the impact of wood co-combustion, as a reburning fuel, with natural gas on the chemical composition of flue gases*. Drewno, 2012; 55: 71–85;
- [28] Zajemska M., Radomiak H.: *Analiza ekonomiczno-ekologiczna energetycznego wykorzystania wybranych paliw*. Rynek Energii, 2011; 31–37;
- [29] Zajemska M., Radomiak H.: *The ecological and economic analysis of heat production from different fuels and wastes*. Rynek Energii, 2011; 33–39;
- [30] Zajemska M., Urbanczyk P., Poskart A.: *The impact of co-firing sunflower husk pellets with coal in a boiler on the chemical composition of flue gas*. Energy and Fuels, 2016; 14: 1–7;
- [31] Załęcka-Kościukiewicz K.: *Problematyka prawna zagospodarowania RDF*. 2015; ;
- [32] <http://creckmodeling.chem.polimi.it/> ;

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF USING RDF FUEL FOR ENERGY PURPOSES

Key words: municipal solid waste, RDF fuel, energetic

Summary. In accordance with Directive 2006/12 / EC of the European Parliament and of the Council of 5 April 2006 on waste and Polish legislation, waste storage is the last and least desirable form of their management. In addition, from January 1, 2016, a ban on storing waste with a calorific value exceeding 6MJ / kg applies in Poland. These premises encourage wider use of waste for energy purposes. Currently, properly prepared waste (RDF) is used as a fuel in the cement industry. Innovative methods of using waste in heat engineering deserve attention. The appliance of increasingly restrictive emission requirements in the EU, imposes the Member States to develop modern installations for energy recovery. Due to the above, the article presents possibilities of municipal waste management, based on the example of RDF fuel, with particular emphasis on installations for energy recovery from waste and methods of its use, as well as the impact of this fuel combustion on the environment. In addition, it focus was on assessing the appropriateness of using RDF fuels for energy purposes, enabling the reduction of the amount of waste deposited and the diversification of fuel and energy sources.

Przemysław Rajca, mgr inż., absolwent kierunku Inżynieria Bezpieczeństwa i Higiena Pracy na Wydziale Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów Politechniki Częstochowskiej. Obecnie rozpoczął doktorat i współpracuje z Katedrą Pieców Przemysłowych i Ochrony Środowiska wspomnianej uczelni.

Monika Zajemska, dr hab. inż. prof. PCz., zastępca kierownika Katedry Pieców Przemysłowych i Ochrony Środowiska. Pani profesor w pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami z zakresu spalania paliw i odpadów, emisji zanieczyszczeń oraz numerycznego modelowania chemii procesu spalania. Jest autorem lub współautorem ponad 170 prac naukowych opublikowanych w czasopismach krajowych i zagranicznych. Za działalność naukową i organizacyjną wielokrotnie została wyróżniona Nagrodami Indywidualnymi i Zespołowymi Rektora Politechniki Częstochowskiej. W 2016 roku otrzymała medal Komisji Edukacji Narodowej.