dr inż. Marta Kowal, dr inż. Wojciech Szulik, Magdalena Winkler
„Energopomiar" Sp. z o.o.

Paliwa z odpadów jako istotny element transformacji energetycznej

Waste derived fuels as an essential element of energy transition

W artykule przedstawiono znaczenie paliw z odpadów (RDF i SRF) jako paliw alternatywnych możliwych do wykorzystania w sektorze energetycznym, ciepłowniczym i cementowym, w kontekście transformacji energetycznej i gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ). Wskazano na rosnącą rolę tych paliw w redukcji emisji gazów cieplarnianych oraz zmniejszaniu ilości odpadów kierowanych na składowiska. Przedstawiono zalety paliw z odpadów. Podkreślono rolę paliw z odpadów w zwiększaniu niezależności energetycznej oraz poprawie efektywności surowcowej, co wpisuje się w dążenie do zrównoważonego rozwoju i nowoczesnej, niskoemisyjnej gospodarki.

Słowa kluczowe: paliwa z odpadów, paliwa alternatywne, transformacja energetyczna, RDF, SRF, gospodarka o obiegu zamkniętym

The article presents the importance of fuels produced from various types of waste (Refuse-Derived Fuel (RDF) and Solid Recovered Fuel (SRF)) as alternative fuels that can be used in power, heating and cement sectors in the context of energy transition and the circular economy (CE). The article highlights the growing role of alternative fuels in reducing greenhouse gas emissions and the amount of waste sent to landfill. The advantages of waste derived fuels are indicated. The article also underlines the role of waste derived fuels in increasing energy independence and improving resource efficiency, which is in line with the striving for sustainability and a modern, low-carbon economy.

Keywords: waste derived fuels, alternative fuels, energy transition, RDF, SRF, circular economy (CE)

Wprowadzenie

Współczesne uwarunkowania społeczno-gospodarcze, w tym postępujące zmiany klimatyczne, wyczerpywanie się zasobów naturalnych oraz rosnące zapotrzebowanie na energię, wymuszają konieczność przeprowadzenia wieloaspektowego procesu transformacji energetycznej [1]. Proces ten, zachodzący w warunkach znacznej zmienności otoczenia biznesowego oraz niestabilności geopolitycznej, obarczony jest wieloma ryzykami. Wobec tego wszystkie dostępne źródła energii – zarówno konwencjonalne, jak i szeroko rozumiane odnawialne źródła energii (OZE) – powinny być analizowane jako elementy procesu tworzące system zrównoważonej transformacji energetycznej [2]. System ten bowiem zakłada nie tylko odejście od paliw kopalnych na rzecz źródeł odnawialnych, lecz również integrację z innymi koncepcjami zrównoważonego rozwoju, w szczególności z gospodarką o obiegu zamkniętym (GOZ) [3].

Istotnym elementem takiego podejścia z punktu widzenia zasobów energetycznych jest efektywne zagospodarowanie frakcji odpadów nienadającej się do recyklingu, a posiadającej potencjał energetyczny, poprzez jej przekształcanie w paliwa alternatywne (ang. Refuse Derived Fuel, RDF; ang. Solid Recovered Fuel, SRF). Paliwa te mogą być wykorzystywane jako źródła energii w sektorze przemysłowym, energetycznym, ciepłowniczym, cementowym [4]. Spełniają one założenia GOZ, w którym z jednej strony zakłada się redukcję zużycia surowców pierwotnych, a z drugiej maksymalizację wykorzystania powstałych odpadów jako surowców wtórnych na kolejnych etapach cyklu produkcyjnego [5], czyli: odpady nie istnieją, bowiem każdy materiał znajduje swoje dalsze zastosowanie. Jednak czy taki ideał jest możliwy?

Przecież nawet w przypadku najbardziej efektywnej segregacji odpadów w celu ich materiałowego recyklingu powstawanie strumienia tak zwanych odpadów resztkowych jest nieuniknione. Jak więc „domknąć" obieg zamknięty? Przede wszystkim należy przyjrzeć się temu, co pozostaje – a pozostaje frakcja odpadów nienadająca się do recyklingu, ale o sporym potencjale paliwowym. Nie można jej składować, bo jej wartość opałowa przekracza 6 MJ/kg [6]. Można natomiast wykorzystać ją jako cenne źródło energii, które będzie wspierać zarówno realizację celów transformacji energetycznej, jak i efektywność systemów gospodarki odpadami. Takie podejście umożliwia jednoczesne ograniczanie ilości odpadów trafiających na składowiska, redukcję emisji gazów cieplarnianych oraz prowadzi do dywersyfikacji źródeł energii. W tym ujęciu paliwa z odpadów w kontekście transformacji energetycznej z uwzględnieniem założeń gospodarki o obiegu zamkniętym oraz ocena ich potencjału jako nośnika energii w zrównoważonym modelu rozwoju wymaga szczegółowej analizy.

Rola paliw z odpadów w sektorze przemysłowym

W kontekście transformacji energetycznej paliwa z odpadów (RDF, SRF) mogą pełnić funkcję tzw. pomostowych źródeł energii – stabilizujących system w okresie przejściowym, gdy udział energii ze źródeł odnawialnych nie jest jeszcze wystarczający do zapewnienia ciągłości dostaw. Ponadto paliwa z odpadów stanowią stabilne i relatywnie lokalne źródło energii, co przekłada się na wzrost bezpieczeństwa energetycznego kraju i regionu.

Światowa Rada Biznesu na rzecz Zrównoważonego Rozwoju wskazuje, że odpady o odzyskiwalnej wartości opałowej mogą być wykorzystywane jako paliwa w piecu cementowym, zastępując część konwencjonalnych paliw kopalnych. Po odpowiednim przetworzeniu frakcja energetyczna odpadów może

więc zostać wykorzystana jako paliwo do produkcji cementu. Szacuje się, że światowa produkcja cementu wynosiła w 2020 roku około 4,1 miliarda ton, co sprawia, że przemysł cementowy jest istotnym odbiorcą paliw z odpadów [7]. Według danych z 2017 roku 18% globalnego zapotrzebowania na energię w przemyśle cementowym zapewniały paliwa z odpadów, przy czym w krajach europejskich, takich jak Austria, Czechy, Niemcy i Polska udział energii pochodzącej ze spalania paliw z odpadów wynosił nawet do 60%.

Ze względu na dostępność, zrównoważony rozwój i mniejszy wpływ na środowisko w porównaniu z kopalnymi źródłami energii, paliwa z odpadów są coraz częściej wykorzystywane w przemyśle energetycznym. Ma to związek przede wszystkim ze zmniejszającym się udziałem odpadów palnych we frakcji energetycznej odpadów, a co za tym idzie niższą, niewystarczającą dla cementowni wartością opałową produkowanych paliw. Spalane paliwo, nawet o niższej wartości opałowej, nie wpływa bowiem na przebieg procesu, tak jak ma to miejsce w przypadku produkcji cementu. Energia z paliw RDF odzyskiwana jest głównie w elektrowniach kogeneracyjnych (CHP) do produkcji energii elektrycznej i ciepła sieciowego [8].

Chociaż dominującym trendem w gospodarowaniu odpadami jest redukcja ich powstawania oraz odzysk materiałowy, istotnym elementem w przetwarzaniu frakcji energetycznej odpadów jest jej termiczne przekształcanie z odzyskiem energii w spalarniach. Na świecie jest ponad 1100 zakładów termicznego przekształcania odpadów o łącznej zdolności przerobowej ponad 700 000 ton odpadów komunalnych dziennie. W Europie w instalacjach termicznego przekształcania spalanych jest 101 milionów ton odpadów rocznie. Rynek termicznego przekształcania odpadów jest więc duży i szacuje się, że do 2029 roku będzie rósł w tempie 4,3% rocznie. Nowoczesne zakłady termicznego przekształcania spełniają rygorystyczne wytyczne dotyczące emisji, regulowane dyrektywą Unii Europejskiej, jak również dokumentów dotyczących najlepszych dostępnych technik dla spalarni – BAT i BREF. Minimalizuje to wpływ spalania odpadów na środowisko i zdrowie człowieka [9].

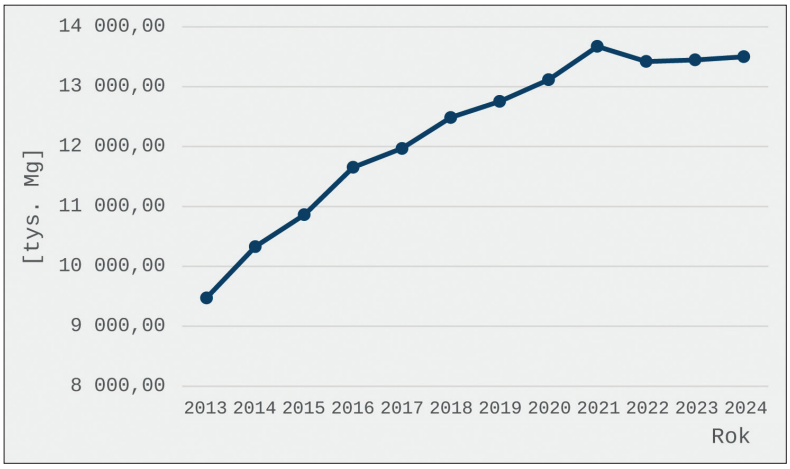
Mimo wielu zalet wykorzystanie paliw z odpadów napotyka również bariery, szczególnie te regulacyjne i społeczne. Akceptacja społeczna dla instalacji termicznego przekształcania odpadów może stanowić istotne ograniczenia dla rozwoju tego sektora. Należy mieć również na uwadze ciągłe upowszechnianie idei ograniczających ilość wytwarzanych odpadów, a rozwój koncepcji ekoprojektowania w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym wraz z rozwojem procesów recyklingu mogą w przyszłości skutkować ustabilizowaniem, a nawet spadkiem wielkości strumienia odpadowego o charakterze energetycznym.

Źródło paliw z odpadów

W wyniku nowelizacji ustawy o utrzymaniu czystości i porządku w gminach od 1 lipca 2013 roku zaczęły funkcjonować nowe przepisy nakładające na gminę obowiązek gospodarowania odpadami komunalnymi. Wtedy to, w związku z uszczelnieniem systemu zbierania i transportu odpadów komunalnych do instalacji przetwarzania odpadów, roczna ilość produkowanych odpadów zaczęła rosnąć.

Opierając się na danych GUS, w Polsce wytwarzanych jest obecnie około 13,5 mln ton odpadów komunalnych rocznie [10]. Po obserwowanym ciągłym wzroście ilości powstających odpadów w latach 2013–2021 o około 500 tys. Mg rocznie, poziom ten w ostatnich latach się ustabilizował. Obserwowany trend ma związek przede wszystkim z przejęciem przez gminy obowiązków związanych z gospodarką odpadami, jak również ze zwiększeniem ogólnego poziomu życia w Polsce. Wzrost ilości wytwarzanych odpadów komunalnych wraz ze wzrostem dochodu na mieszkańca jest bowiem zależnością obserwowaną na całym świecie.

Odpady komunalne wraz z odpadami przemysłowymi, których nie można użyć ponownie ani poddać procesowi recyklingu, są prekursorami w produkcji paliw z odpadów.



Rys. 1. Ilość powstałych odpadów komunalnych w Polsce w latach 2013–2024 (źródło: [10])

Czym są paliwa z odpadów?

W obowiązującym w Polsce systemie gospodarki odpadami komunalnymi, selektywnie zebrane frakcje, takie jak papier i tektura (tak zwany „worek niebieski"), szkło („worek zielony"), tworzywa sztuczne i metale („worek żółty"), a także odpady biodegradowalne („worek brązowy"), kierowane są do recyklingu. Pozostała frakcja, część zmieszanych odpadów komunalnych, klasyfikowana jako odpad o kodzie 20 03 01 [11] („worek czarny"), trafia do instalacji mechaniczno-biologicznego przetwarzania (MBP).

W instalacjach MBP, poprzez procesy mechaniczne, takie jak przesiewanie, rozdrabnianie i sortowanie, odpady te zostają rozdzielone na trzy główne strumienie.

A. Frakcja nadsitowa – obejmuje elementy o rozmiarze ziarna powyżej 80–100 mm. Składa się głównie z odpadów palnych, charakteryzujących się wysoką wartością opałową. Materiał ten nazywany jest preRDF, a po oczyszczeniu z frakcji niepalnych i balastu – RDF. Odpady te są klasyfikowane jako odpad o kodzie 19 12 12 [8] i stanowią około 40% masy pierwotnego wsadu. Ich wartość opałowa wynosi przeciętnie 10–12 MJ/kg, a po dodatkowym oczyszczeniu nawet 12–16 MJ/kg.

B. **Frakcja biologiczna** – kierowana jest najczęściej do procesu kompostowania lub stabilizacji tlenowej, czego efektem jest powstanie niskiej jakości kompostu, zwanego stabilizatem.
C. **Frakcja drobna, mineralna (balastowa)** – składa się z cząstek o wielkości poniżej 10 mm i nie posiada właściwości energetycznych ani nawozowych. Ten strumień trafia bezpośrednio na składowiska odpadów.

Produktem sortowania zmieszanych odpadów komunalnych w instalacjach MBP są odpady o kodzie 19 12 10 [11] stanowiące materiał o homogenicznym rozmiarze ziaren, w skład których wchodzi głównie wysokokaloryczna frakcja odpadów komunalnych. Wytworzony produkt zawiera następujące komponenty: tworzywa sztuczne, papier i tektura, drewno czy guma. Zasadniczym działaniem instalacji MBP jest otrzymanie takiej jednorodności w całej masie odpadu o kodzie 19 12 10, aby zapewnić stabilne parametry techniczne, środowiskowe i energetyczne wyprodukowanego paliwa zodpadów. Dzięki temu produkt ten może pełnić funkcję paliwa alternatywnego i być wykorzystywany jako źródło energii w procesach przemysłowych.

Paliwa z odpadów w laboratorium

Zróżnicowany skład komponentów paliwa RDF powoduje, że jego jakość określana jest przez szereg parametrów fizykochemicznych.

W normie PN-EN ISO 21640:2021-10 [12] przedstawiono system klasyfikacji stałych paliw wtórnych na pięć klas według wartości trzech parametrów jakościowych: wartości opałowej, zwartości chloru, zawartości rtęci.

W tabeli 1 przedstawiono parametry klasyfikacyjne, wartości graniczne dla pięciu klas stałych paliw wtórnych.

Z punktu widzenia technologicznego klasa paliwa wskazana w przywołanej normie nie jest wystarczającym kryterium w charakterystyce paliw z odpadów. W związku z tym, w zależności od sposobu wykorzystania paliwa, istotne może być kontrolowanie takich parametrów, jak:

- skład elementarny paliwa: zawartość węgla całkowitego, zawartość siarki całkowitej, zawartość wodoru i zawartość azotu,
- zawartość chloru całkowitego i fluoru,
- zawartość metali ciężkich,
- zawartość alkaliów,
- zawartość frakcji biomasy.

Typowe parametry jakościowe paliw z odpadów, na podstawie badań własnych w zależności od kierunku wykorzystania, charakteryzują się wartościami przedstawionymi w tabeli 2.

Z punktu widzenia odbiorców końcowych paliwa kluczowa jest również stabilność parametrów w czasie oraz dostępność w wymaganej ilości. W tym celu zakłady przetwarzające odpady często wdrażają dodatkowe systemy sortowania (np. optyczne) oraz kontrolę jakości poprzez zwiększenie częstotliwości badań laboratoryjnych. Podjęte działania dają efekt w postaci stabilności kluczowych parametrów jakościowych.

Na rysunku 2 przedstawiono oznaczone wyniki wartości opałowej paliwa RDF dla badań realizowanych przez okres 12 miesięcy. Ze względu na wpływ zawartości wilgoci całkowitej w paliwie na jej wartość opałową na rysunku 3 zaprezentowano wyniki badań zawartości wilgoci całkowitej w paliwach RDF. Przedstawione dane opracowano na podstawie ponad 500 jednostkowych badań próbek.

Tabela 1

System klasyfikacji stałych paliw wtórnych na podstawie normy PN-EN ISO 21640:2021-10

Parametr klasyfikacyjny	Miara statystyczna	Jednostka	Klasy				
			1	2	3	4	5
Wartość opałowa (NCV)	średnia arytmetyczna	MJ/kg (ar)	⩾ 25	⩾ 20	⩾ 15	⩾ 10	⩾ 3
Zawartość chloru (Cl)	średnia arytmetyczna	% masowy (d)	⩽ 0,2	⩽ 0,6	⩽ 1,0	⩽ 1,5	⩽ 3
Zawartość rtęci (Hg)	mediana	Mg/MJ (ar)	⩽ 0,02	⩽ 0,03	⩽ 0,05	⩽ 0,1	⩽ 0,15
	80 percentyla	Mg/MJ (ar)	⩽ 0,04	⩽ 0,06	⩽ 0,10	⩽ 0,20	⩽ 0,30

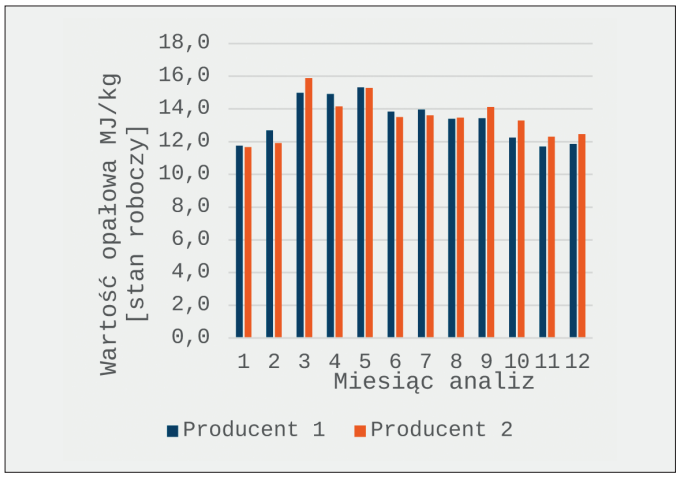
ar – stan roboczy
d – stan suchy
(źródło: [12])

Tabela 2

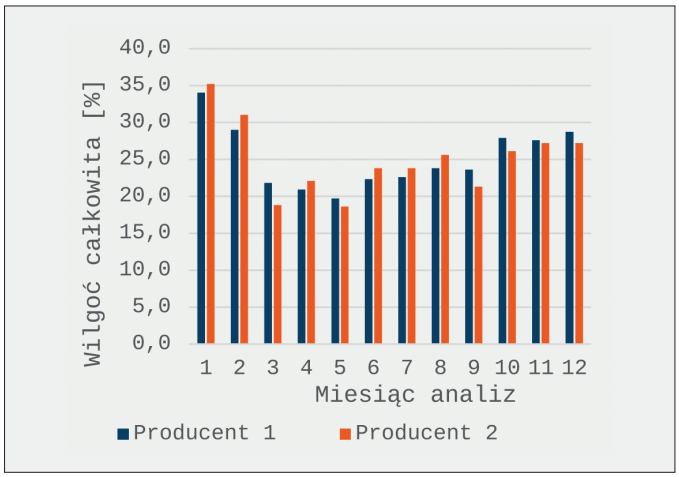
Typowe parametry jakościowe paliw z odpadów

Parametr	Główny kierunek zastosowania przemysłowego		
	spalarnie odpadów – produkcja ciepła i energii elektrycznej	elektrociepłownie – produkcja ciepła i energii elektrycznej	cementownie – produkcja cementu
Wartość opałowa	7–14 MJ/kg	15–20 MJ/kg	20–25 MJ/kg
Zawartość wilgoci	30–50%	10–25%	5–15%
Zawartość popiołu	15–30%	10–20%	<15%
Zawartość chloru całkowitego	0,3–1,0%	0,3–1,0%	<0,6%
Zawartość biomasy	40–65%	20–40%	<30%

(źródło: opracowanie własne)



Rys. 2. Średniomiesięczna analiza parametrów jakościowych – wartość opałowa MJ/kg w stanie roboczym (źródło: opracowanie własne)



Rys. 3. Średniomiesięczna analiza parametrów jakościowych – zawartość wilgoci całkowitej [%] (źródło: opracowanie własne)

Tabela 3

Zestawienie miesięcznych współczynników zmienności dla zawartości wilgoci całkowitej, popiołu i wartości opałowej w stanie roboczym, %

Lp.	Zawartość wilgoci całkowitej		Wartość opałowa	
	producent 1	producent 2	producent 1	producent 2
1	18,07	17,51	15,63	16,60
2	18,63	23,67	13,94	16,04
3	21,46	23,09	12,27	14,84
4	23,81	24,91	14,51	7,75
5	23,32	23,34	14,57	10,75
6	17,88	14,65	9,40	11,81
7	20,19	16,26	8,81	9,70
8	35,93	11,71	19,98	11,04
9	24,22	22,01	11,40	14,96
10	15,63	12,77	11,72	8,04
11	16,62	14,48	11,43	13,19
12	13,61	19,86	13,93	13,92

(źródło: opracowanie własne)

Do oceny statystycznej wyników wykorzystano umowny podział wartości współczynnika zmienności (zmienność) na cztery grupy, w zależności od jego wartości:

I <25% – mała zmienność,
II od 25% do <45% – przeciętna zmienność,
III od 45%; <100% – silna zmienność,
IV powyżej 100% – bardzo silna zmienność.

Dla oznaczenia zawartości wilgoci całkowitej i wartości opałowej w stanie roboczym otrzymano niemalże dla wszystkich przypadków małą zmienność – tj. poniżej 25%.

Porównując dwóch producentów paliw z odpadów wytwarzających paliwo zgodnie ze specyfikacją odbiorcy oraz uwzględniając podwyższoną zawartość wilgoci w sezonie jesienno-zimowym, należy stwierdzić, że zastosowane metody sortowania i przetwarzania frakcji energetycznej odpadów pozwalają na wytworzenie stabilnego produktu, co zostało potwierdzone w badaniach laboratoryjnych.

Proces produkcji paliw z odpadów może być zatem prowadzony w sposób kontrolowany, zapewniający niewielką zmienność kluczowych parametrów jakościowych paliwa. Potwierdza to możliwości wytwórców podjęcia produkcji paliw z odpadów spełniających określone wymagania jakościowe, co ma istotne znaczenie z punktu widzenia efektywności energetycznej i bezpieczeństwa infrastruktury w ich termicznym przekształcaniu.

Wyzwania w analityce paliw z odpadów

Produkcja paliw z odpadów, przez ciągłe zmiany w specyfikacji przerabianego materiału, wymaga od producentów paliw monitorowania parametrów jakościowych. Biorąc pod uwagę złożoność matrycy, jej uziarnienie oraz pochodzenie komponentów, nietrudno zorientować się, że zagadnienia związane z analityką tego typu próbek są bardzo trudne. Szacuje się, że sam etap przedanalityczny, związany z pobieraniem i przygotowaniem próbek do badania, może być obarczony nawet kilkudziesięcioprocentowym błędem.

Dla przykładu w tabeli 4 przedstawiono badania morfologii odpadu 19 12 12 – frakcji nadsitowej po sortowaniu odpadu 20 03 01. Skład morfologiczny przedstawiono dla pięciu próbek pochodzących z trzech lokalizacji, każdą próbkę rozdzielono na 15 frakcji i określono ich udziały masowe. Badania potwierdzają różnorodny skład odpadów, który dla laboratorium przekłada się na niejednorodność materiału, różnicę w podatności na mielenie poszczególnych komponentów, a tym samym trudności w homogenizacji próbki.

Z próbek wydzielono następujące frakcje:

1) odpady spożywcze pochodzenia roślinnego (obierki, resztki jarzyn i owoców, zgniłe warzywa i owoce, resztki pokonsumpcyjne pożywienia, produkty spożywcze potraktowane jako odpady, np. pieczywo, mąka, kasza);
2) odpady spożywcze pochodzenia zwierzęcego (resztki mięsa, kości, wyroby z mięs, ryb, tłuszczów, serów);

3) odpady papieru i tektury;
4) odpady tworzyw sztucznych 1 (folie);
5) odpady tworzyw sztucznych 2 (plastik twardy);
6) odpady tworzyw sztucznych 3 (chemia gospodarcza – plastik miękki);
7) odpady tworzyw sztucznych 4 (PET wraz z etykietkami);
8) odpady tworzyw sztucznych 5 (tetrapack);
9) odpady materiałów tekstylnych (wszelkie resztki oraz wyroby z materiałów wełnianych, bawełnianych, lnianych i włókien chemicznych);
10) odpady szklane (wyroby ze szkła oraz stłuczka szklana);
11) odpady metali – żelazne (wszelkie wyroby i złom ze wszystkich rodzajów metali);
12) odpady metali – nieżelazne (wszelkie wyroby i złom ze wszystkich rodzajów metali);
13) odpady organiczne pozostałe (odpady organiczne pozostałe po wyselekcjonowaniu składników 1–9, np. resztki roślin, zeschnięte kwiaty, trawa, gałęzie, drewno);
14) odpady mineralne pozostałe (odpady mineralne pozostałe po wyselekcjonowaniu składników 10–12, np. kawałki betonu, cegły, resztki ceramiczne);
15) frakcja o uziarnieniu <10 mm.

Każdą z wymienionych w tabeli frakcji przygotowano jako osobną próbkę i poddano badaniom. Dla wydzielonych frakcji badania wykazały, że oznaczane parametry są porównywalne. Zgodnie z przypuszczeniami różnią się one znacząco między frakcjami – zawartość węgla całkowitego oznaczona we frakcjach wynosi średnio od około 2 do 70% (rys. 4). Z punktu widzenia laboratorium badana próbka paliwa z odpadów jest zatem mieszaniną co najmniej 15 różnych próbek o skrajnie różnych parametrach paliwowych.

Po wydzieleniu próbki laboratoryjnej surowego materiału następuje pomniejszanie jej do próbki analitycznej. Proces ten ma na celu zmniejszenie rozmiaru uziarnienia próbki do poziomu <1 mm, gdyż taki rozmiar ziarna wymagany jest przez dokumenty odniesienia dla większości oznaczeń (rys. 5).

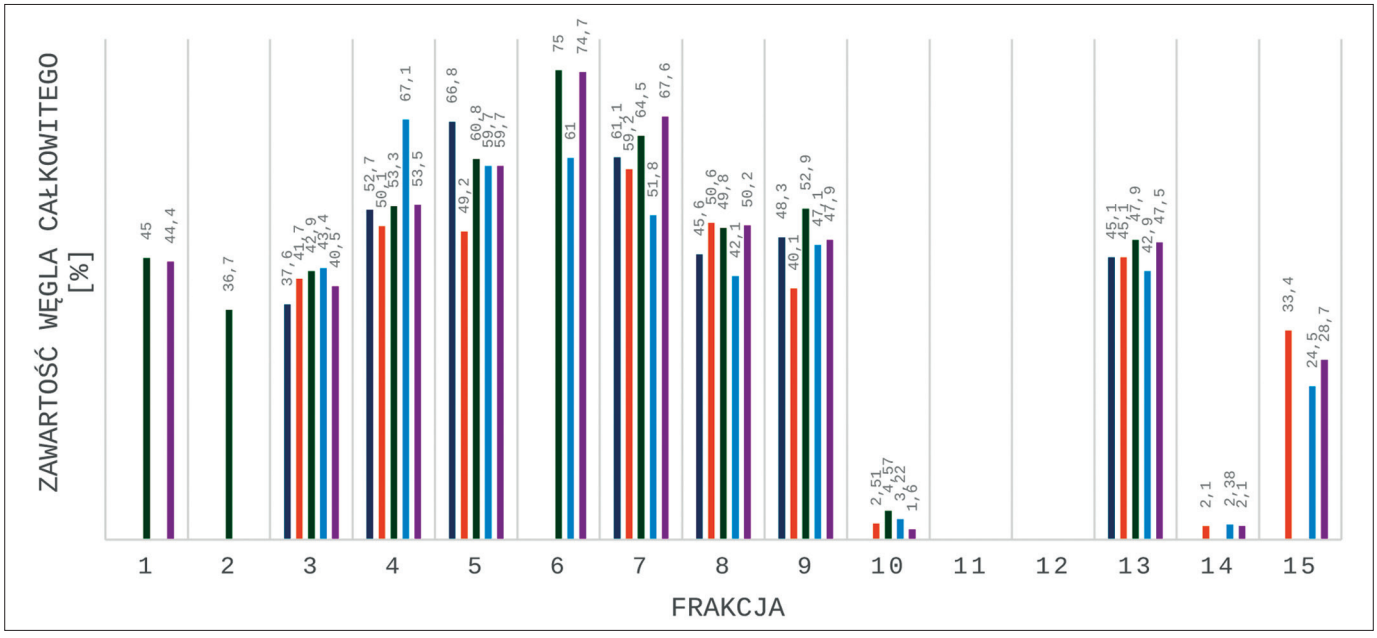
Każdy z etapów pomniejszania próbki należy prowadzić tak, aby reprezentatywność partii była zachowana.

Tabela 4

Skład morfologiczny próbek odpadów 19 12 12 z trzech lokalizacji

Frakcja	Lokalizacja 1		Lokalizacja 2		Lokalizacja 3
	próbka 1, %	próbka 2, %	próbka 1, %	próbka 2, %	próbka 1, %
1	0,0	0,0	22,5	0,0	0,8
2	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0
3	14,2	15,3	8,8	7,7	22,6
4	29,8	17,4	15,8	29,1	30,2
5	12,1	15,4	4,4	18,0	3,1
6	0,0	0,0	4,3	1,6	0,6
7	11,3	2,1	6,9	3,2	3,2
8	0,7	0,9	0,3	2,6	0,4
9	22,9	17,2	29,1	30,5	28,4
10	0,0	10,3	0,8	0,4	0,4
11	5,1	2,7	2,1	1,3	0,7
12	3,8	1,2	0,4	0,6	0,5
13	0,1	1,2	3,0	0,5	3,3
14	0,0	12,5	0,0	1,7	4,9
15	0,0	3,8	0,0	2,8	0,9

(źródło: opracowanie własne)



Rys. 4. Zawartość węgla całkowitego w wydzielonych frakcjach morfologicznych odpadów 19 12 12 (źródło: opracowanie własne)

Rys. 5. Próbka dostarczona do laboratorium (A), pomniejszona do uziarnienia <30 mm (B), pomniejszona do uziarnienia <1 mm (źródło: opracowanie własne)

Badania laboratoryjne a produkcja paliw z odpadów

Produkcja paliw z odpadów spełniających określone wymagania jakościowe często wymaga zrealizowania po stronie producenta szeregu badań laboratoryjnych wspierających podjęcie decyzji o docelowym składzie surowcowym paliwa. Przykładowe wyniki komponowania paliwa o pożądanych parametrach użytkowych przedstawiono w tabeli 5.

Przyjęto założenie, zgodnie ze specyfikacją odbiorcy paliwa, że paliwo musi mieć wartość opałową 20 000 J/g przy zawartości popiołu max 20% oraz zawartości chloru poniżej 0,6%.

Jako komponenty paliwa wytypowano dwa surowce. Surowiec A charakteryzował się prawie czterokrotnie wyższą zawartością wilgoci całkowitej w stosunku do surowca B i czterokrotnie niższą zawartością popiołu. Zawartość chloru całkowitego była w surowcu A o ponad 50% niższa w stosunku do surowca B. Wartość opałowa obu surowców była porównywalna i spełniała specyfikację odbiorcy.

W wyniku komponowania odpowiedniej mieszanki wymaganą zawartość chloru uzyskano przy mieszaniu surowców w stosunku masowym 1:1. Kryterium związane z zawartością popiołu przy tym stosunku masowym również zostało spełnione.

Podsumowanie

W dobie rosnącej presji związanej z dekarbonizacją gospodarki oraz konieczności osiągnięcia celów klimatycznych, nośniki energii o charakterze odpadowym zyskują na znaczeniu jako istotny element transformacji energetycznej oraz realizacji założeń gospodarki o obiegu zamkniętym. Ich wykorzystanie umożliwia nie tylko efektywne zagospodarowanie resztkowych frakcji odpadów, które nie nadają się do recyklingu materiałowego, ale również przyczynia się do ograniczenia składowania oraz zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych.

Analiza parametrów jakościowych RDF/SRF wykazuje, że mogą one stanowić stabilne źródło energii o przewidywalnych właściwościach, co potwierdzają badania laboratoryjne. Kluczowym czynnikiem warunkującym efektywne wykorzystanie tych paliw jest zapewnienie odpowiedniej jednorodności oraz kontrola zawartości kluczowych parametrów jakościowych, np. zawartości wilgoci, popiołu czy wartości opałowej.

Włączenie paliw z odpadów do krajowego miksu energetycznego, zwłaszcza w sektorze cementowym i elektrociepłowniczym, nie tylko zwiększa bezpieczeństwo energetyczne, ale także umożliwia odzysk energetyczny z materiałów nienadających się do innego wykorzystania. Należy jednak zaznaczyć, że rola RDF/SRF powinna być uzupełniająca wobec recyklingu, a nie konkurencyjna względem niego.

Tabela 5

Badania surowców i ich kombinacji: udziały masowe a właściwości końcowe

Badana cecha	100% surowiec A	Udział masowy surowca A do B 5:1	Udział masowy surowca A do B 3:1	Udział masowy surowca A do B 1:1	Udział masowy surowca A do B 1:3	Udział masowy surowca A do B 1:5	100% surowiec B
Wilgoć całkowita, %	14,7	13,50	13,8	14,5	7,30	6,9	3,9
Popiół, % – stan roboczy	7,9	11,00	12,0	17,7	21,9	25,5	30,9
Wartość opałowa, J/g	20 450	20 710	20 640	20 070	21 090	19 810	20 550
Węgiel, % – stan suchy	61,1	60,9	60,0	59,3	54,6	54,3	49,6
Wodór, % – stan suchy	8,93	7,60	7,55	7,59	7,09	6,96	7,54
Azot, % – stan suchy	4,27	3,84	3,76	2,96	2,04	2,47	0,84
Siarka całkowita, %	0,12	0,13	0,1	0,14	0,11	0,08	0,06
Chlor całkowity, %	**0,38**	**0,34**	**0,43**	**0,57**	**0,7**	**0,81**	**0,86**

(źródło: opracowanie własne)

Rozwój sektora paliw z odpadów wymaga dalszych inwestycji w technologie sortowania, optymalizacji procesów przetwarzania oraz wdrażania systemów kontroli jakości. Niezbędne jest również zapewnienie odpowiednich ram regulacyjnych i akceptacji społecznej dla instalacji przetwarzania termicznego. W dłuższej perspektywie, przy jednoczesnym wzroście efektywności recyklingu i ekoprojektowania, można spodziewać się stabilizacji lub nawet spadku strumienia odpadów nadających się do energetycznego wykorzystania.

Paliwa z odpadów to realne i perspektywiczne uzupełnienie strategii zrównoważonego rozwoju sektora energetyki i przemysłu, przy założeniu zachowania równowagi pomiędzy efektywnością środowiskową, ekonomiczną i społeczną. Stanowią one ważny element procesu transformacji energetycznej.

PIŚMIENNICTWO

[1] International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2023, https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023 [dostęp: 20.06.2025].

[2] United Nations Environment Programme (UNEP), Global Waste Management Outlook 2, 2021, https://www.unep.org/resources/report/global-waste-management-outlook-2 [dostęp: 20.06.2025].

[3] European Commission, A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe, 2020, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098 [dostęp: 20.06.2025].

[4] Ferronato N.,Giaquinta Ch.,Conti F., Torretta V., *When solid recovered fuel (SRF) production and consumption maximize environmental benefits? A life cycle assessment,* „Waste Management" 2024, nr 178, https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.02.029 [dostęp: 20.06.2025].

[5] Korhonen J., Honkasalo A., Seppälä J., *Circular economy: The concept and its limitations*, „Ecological Economics" 2018, nr 143. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041 [dostęp: 20.06.2025].

[6] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach, Dz. U. 2015, poz. 1277.

[7] Kahawalage A. C., Melaaen M. C., Tokheim L.-A., *Opportunities and challenges of using SRF as an alternative fuel in the cement industry*, „Cleaner Waste Systems" 2023, nr 4.

[8] Janda A., Urbańska W. M., *Current problems in the combustible municipal waste management – a casy study for pre-RDF*, *RDF and SRF management in Poland,* „Zeszyty Naukowe SGSP" 2024, Vol.1.

[9] Traven L., *The potential for a combined heat and power (CHP) generation from municipal solid waste: A case study of Croatia*, „Case Studies in Chemical and Environmental Engineering" 2023, nr 8.

[10] Główny Urząd Statystyczny, *Ochrona środowiska 2013–2024*, https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/srodowisko [dostęp: 20.06.2025].

[11] Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów, Dz.U. 2020, poz. 10.

[12] PN-EN ISO 21640:2021-10 *Stałe paliwa wtórne – Specyfikacje i klasy*.