

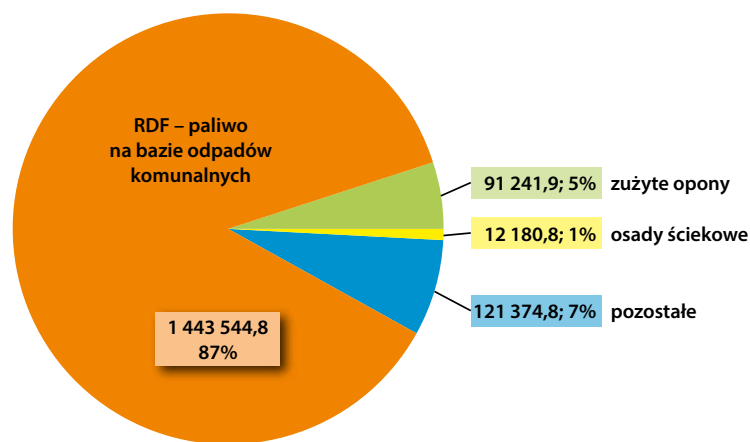
# Paliwa alternatywne – fakty i mity

Paliwa alternatywne produkowane na bazie odpadów mogą być wykorzystywane w różnych sektorach przemysłowych do wytwarzania ciepła lub energii elektrycznej. Jest to jeden z nowoczesnych sposobów zagospodarowania odpadów, który wpisuje się w aktualne programy zrównoważonego, efektywnego wykorzystania zasobów w Europie. Cementownie w Polsce od ponad 20 lat stosują paliwa alternatywne i jest to sprawdzona, bezpieczna metoda zagospodarowania odpadów. Wykorzystanie paliw alternatywnych w cementowniach można analizować w różnych aspektach – dostępności i jakości paliw z odpadów, wymagań prawnych w zakresie ochrony środowiska, infrastruktury i rozwiązań technicznych, wpływu na produkt i proces, korzyści dla środowiska, ochrony klimatu itp. Ocena wpływu stosowania paliw alternatywnych na środowisko, na proces i wytwarzany produkt jest przedmiotem badań na całym świecie od kilkudziesięciu lat i dlatego uwarunkowania techniczne i środowiskowe zostały dość dobrze poznane i udokumentowane.

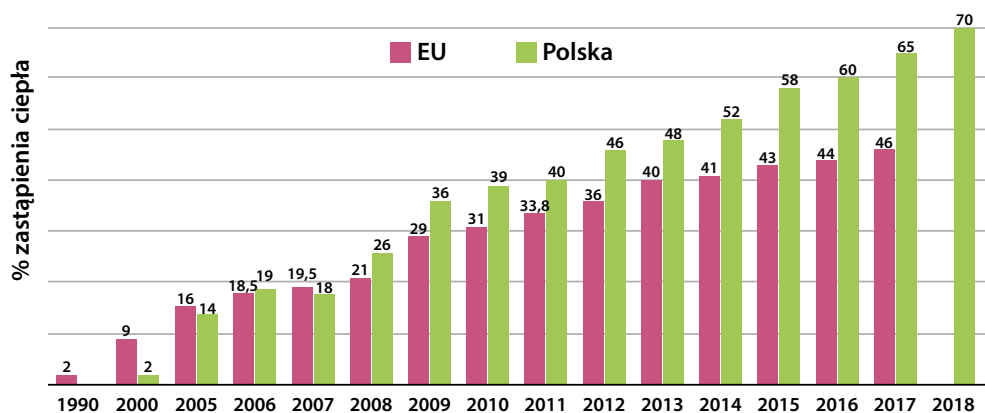
## Jaka jest rola cementowni w systemie gospodarki odpadami komunalnymi w Polsce?

Obecnie, cementownie wykorzystują głównie paliwa alternatywne, tzw. RDF – gotowe, mieszane paliwo stałe produkowane przede wszystkim na bazie odpadów komunalnych z dodatkiem odpadów przemysłowych. Oprócz tego cementownie wykorzystują także zużyte opony i inne odpady w niewielkich ilościach.

Rys. 1. Zużycie paliw alternatywnych przez cementownie w 2018 r.



Rys. 2. Udział ciepła z paliw alternatywnych – średnio w Europie i sektorze cementowym w Polsce



Aktualne zużycie RDF kształtuje się na poziomie ok. 1,5 mln ton rocznie. Biorąc pod uwagę średni udział frakcji komunalnej w tych paliwach oraz masę wytwarzanych w Polsce odpadów komunalnych można stwierdzić, że ok. 10% odpadów komunalnych w Polsce zagospodarowują cementownie.

## W jaki sposób przemysł cementowy w Polsce osiągnął tak wysoki poziom zastąpienia ciepła paliwami alternatywnymi?

Produkcja cementu jest procesem energochłonnym. W tym sektorze zużycie energii i efektywność energetyczna są podstawowymi parametrami ekonomicznym. Rozwój wykorzystania RDF w cementowniach był możliwy dzięki licznym inwestycjom, które miały miejsce w ostatnich kilkunastu latach, przy czym każdy zakład wykorzystał specyficzne dla swojej instalacji rozwiązania techniczne. Stosując paliwo o niższej wartości opałowej w porównaniu do zastępowanego pyłu węglowego, niezbędne było znalezienie metod stabilizacji procesu produkcji i/lub jakości takiego paliwa. W jednym z zakładów zainstalowano unikalną w skali Europy suszarnię bębnową do suszenia RDF, wykorzystując ciepło odpadowe z instalacji pieca cementowego. Jednak nie w każdym zakładzie takie rozwiązanie byłoby możliwe do wdrożenia ze względu na niedostateczną ilość ciepła odpadowego. Popularnym rozwiązaniem jest zastosowanie wielopunktowego systemu dozowania paliwa do kalcynatora, co umożliwi lepszą stabilizację procesu spalania i równomierny rozkład temperatury. Stosuje się systemy bocznikowania gazów piecowych, aby usunąć część chloru z instalacji pieca cementowego – niezwykle szkodliwego składnika mogącego zakłócać pracę pieca cementowego. Cementownie stosują także regularną kontrolę dostaw paliw alternatywnych oraz metody segregacji i homogenizacji RDF w magazynie paliw. Niektóre decydują się również na budowę instalacji do wykorzystania, tzw. pre-RDF, aby w większym stopniu móc wpływać na jakość stosowanego paliwa.

## Dlaczego piec cementowy jest jednym z najlepszych, jeśli nie najlepszym, urządzeniem do termicznego przekształcania odpadów?

Przy spalaniu jakichkolwiek paliw najważniejszymi parametrami z punktu widzenia ochrony śro-

dowiska jest odpowiednio wysoka temperatura, czas przepływu gazów odlotowych w systemie pieca, dobre wymieszanie paliwa z utleniaczem i stabilność termiczna urządzenia. W piecu cementowym temperatura gazów odlotowych wynosi do 2000°C, a wypalanego materiału 1450°C; w strefie temperatury powyżej 1200°C czas przebywania gazów wynosi do 10 sekund z nadwyżką tlenu rzędu 2-3%. Dodatkowo w strumieniu gazów są cząstki fazy stałej (mączki surowcowej), co pozwala na dobre wymieszanie paliwa z utleniaczem. W przypadku awaryjnego przerwania spalania paliwa temperatura powierzchni wymurówki i materiału w piecu nie ulega obniżeniu przez około pół godziny, ponieważ masa wymurowanego cegłą ogniotrwałą pieca obrotowego wraz ze znajdującym się w nim materiałem, zależnie od wielkości instalacji, wynosi od kilkuset do blisko trzech tysięcy ton. Nie do przecenienia jest również brak odpadów po spalaniu paliw alternatywnych – popiół pozostający po spalaniu paliwa miesza się z wypalonym materiałem i jego składniki wchodzi w skład klinkieru cementowego. Jest to więc proces bezodpadowy. Dodatkowo, w piecu cementowym wypalany materiał ma charakter alkaliczny, dzięki czemu wiąże on zawarte w gazach spalinowych składniki o charakterze kwaśnym, np. SO<sub>2</sub>, a powstające związki wchodzi w skład klinkieru.

#### Czy spalanie paliw alternatywnych w cementowni wpływa negatywnie na jakość cementu?

Podstawowym zadaniem cementowni jest produkcja dobrej jakości cementu zgodnie z normami budowlanymi. Celem spalania paliw w cementowni jest wytworzenie ciepła niezbędnego do przeprowadzenia reakcji chemicznych w piecu. W tym celu można spalać różnego rodzaju paliwa wyprodukowane na bazie odpadów, ale muszą one spełniać określone wymagania cementowni co do ich jakości, w tym kaloryczności i składu chemicznego. Wymagania te dotyczą stanu fizycznego paliwa, jego wartości opałowej, składu chemicznego (szczególnie zawartość takich pierwiastków jak sód, potas, chlor, fluor), toksyczności (wielko-cząsteczkowe cząstki aromatyczne, PCB, metale ciężkie), ilości i składu chemicznego popiołu, wilgotności, jednorodności, zdolności do obróbki i transportu, uziarnienia czy gęstości. Ograniczenia w tym zakresie są sprawą indywidualną dla danej instalacji pieca i każdorazowo parametry są uzgadniane z dostawcą paliwa. Te wymagania cementowni są konieczne ze względu na poprawną pracę pieca cementowego, kontrolę emisji do atmosfery i dbałość o zapewnienie jak najlepszej jakości wytwarzanego produktu.

#### Jakie są wymagania prawne w zakresie emisji do powietrza przy stosowaniu paliw alternatywnych?

Cementownię obowiązują wymagania wynikające z Konkluzji BAT, które wprowadzają rygorystyczne standardy emisyjne, niezależnie od stosowanego przez cementownię paliwa. Te limity są określone w odpowiednich decyzjach administracyjnych, w tzw. pozwoleniach zintegrowanych, które regulują całość spraw związanych z funkcjonowaniem cementowni w środowisku. Wypełnianie przez cementownię wymagań, wynikających

Tab. 1. Lista substancji monitorowanych w cementowni i limity emisyjne

Lp.	Nazwa substancji	Sposób prowadzenia pomiaru	Standardy emisyjne w mg/m <sup>3</sup> (dla dioksyn i furanów w ng/m <sup>3</sup> ), przy zawartości 10% tlenu w gazach odlotowych
1.	pył całkowity	Ciągły	20-30
2.	chlorowodór (HCl)	Ciągły lub okresowy	10
3.	fluorowodór (HF)	Ciągły lub okresowy	1
4.	tlenki azotu (NOx) dla istniejących instalacji	Ciągły	450-500
5.	dwutlenek siarki (SO <sub>2</sub> )	Ciągły	50-400
6.	wyciek amoniaku	Ciągły	30-50
7.	substancje organiczne w postaci gazów i par wyrażone jako całkowity węgiel organiczny	Ciągły lub okresowy	10
8.	tlenek węgla (CO)	Ciągły	2000
9.	kadm + tal (Cd + Tl)	Okresowy, 2-4 razy w roku	0,05
10.	rteć (Hg)	Okresowy, 2-4 razy w roku	0,05
11.	antymon + arsen + ołów + chrom + kobalt + miedź + mangan + nikiel + wanad (Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V)	Okresowy, 2-4 razy w roku	0,5
12.	dioksyny i furany	Okresowy, 2-4 razy w roku	0,05-0,1

z pozwoleń zintegrowanych w zakresie ochrony środowiska, nadzorują Wojewódzkie Inspektoraty Ochrony Środowiska.

#### W jaki sposób cementownie ograniczyły emisje pyłowe do powietrza?

Pyły cementowe to cząstki przepływającego przez piec materiału, porywane i unoszone przez gazy odlotowe do urządzeń odpylających, w których są wychwytywane i zwracane z powrotem do pieca. Te pyły składają się głównie z węgla i tlenu wapnia oraz wapnia i magnezu, a także siarczemu wapnia, dwutlenku krzemu czy soli alkaliów. W stosunku do roku 1989 aktualna emisja pyłowa z cementowni została zredukowana ponad 70-krotnie i obecnie wynosi 0,07 kg na tonę cementu. Znaczące ograniczenie emisji pyłowych na tonę produkowanego cementu było bezpośrednim efektem przeprowadzonych modernizacji zakładów cementowych i zainstalowania najnowszych rozwiązań technicznych i technologicznych obecnie dostępnych oraz nowoczesnych systemów odpylających – głównie są to filtry tkaninowe lub hybrydowe o bardzo wysokiej skuteczności wychwytywania pyłów.

#### Czy podczas spalania paliw alternatywnych emitowane są metale ciężkie?

Każdy naturalny czy alternatywny surowiec lub paliwo wykorzystywane w różnych gałęziach przemysłu zawierają w swoim składzie różnego rodzaju metale i inne związki. Również surowce, węgiel czy paliwa alternatywne wykorzystywane w cementowni mogą zawierać różne metale. Cementownie oprócz kontroli emisji metali do powietrza wymaganej przepisami prowadzą także systematyczne badania zawartości i wymywalności metali z cementu i betonu. Dotychczas nie obserwowano niekorzystnego wpływu wynikającego z coraz większego zastępowania węgla paliwami alternatywnymi. Co więcej, w przypadku niektórych metali można zauważyć ich niższą zawartość

w porównaniu do zawartości w węglu. Mechanizm zachowania się metali i ich związków w piecu cementowym został szeroko na świecie i w Polsce przebadany i jest dobrze udokumentowany. Dzięki temu można w pełni kontrolować wpływ różnych metali na emisję do powietrza, wpływ na jakość wytwarzanego produktu, czy na proces. Metale nie ulegają zniszczeniu w urządzeniu do spalania – najmniej lotne metale, które są odporne na działanie wysokich temperatur (Cr, Be, Ba, Ni, As) wbudowują się w strukturę minerałów klinkierowych i fazę szklistą klinkieru, będąc skutecznie związane w jego strukturze. Wysoka skuteczność immobilizacji w produktach końcowych – w zaprawach i betonie jest również dobrze udokumentowana. Wyniki tych badań wykazują, iż są one praktycznie niewymywalne z zapraw czy z betonu. Z kolei metale o przeciętnej lotności, jak Sb, Se, Pb, Zn, Cd, charakteryzują się zdolnością do tworzenia obiegów wewnętrznych w systemie pieca cementowego. Odparowane w gorącej części pieca związki metali mogą kondensować w wymienniku cyklonowym bądź dekarbonizatorze na porywanych przez gazy cząstkach stałych w piecu. Ilość tych metali jest ściśle monitorowana w cementowni ze względu na jakość klinkieru portlandzkiego. Najbardziej lotne metale, jak rtęć czy tal, jeżeli zachodzi taka potrzeba, są ograniczane na wejściu do pieca. W przypadku np. rtęci obserwuje się, że jej zawartość w węglu jest wyższa niż paliwach z odpadów. Na podstawie wieloletnich badań można stwierdzić, że paliwa alternatywne mają korzystny wpływ na ograniczenie emisji metali z przemysłu cementowego.

#### Dlaczego cementownie narzucają dostawcom paliw alternatywnych ograniczenia dotyczące chloru?

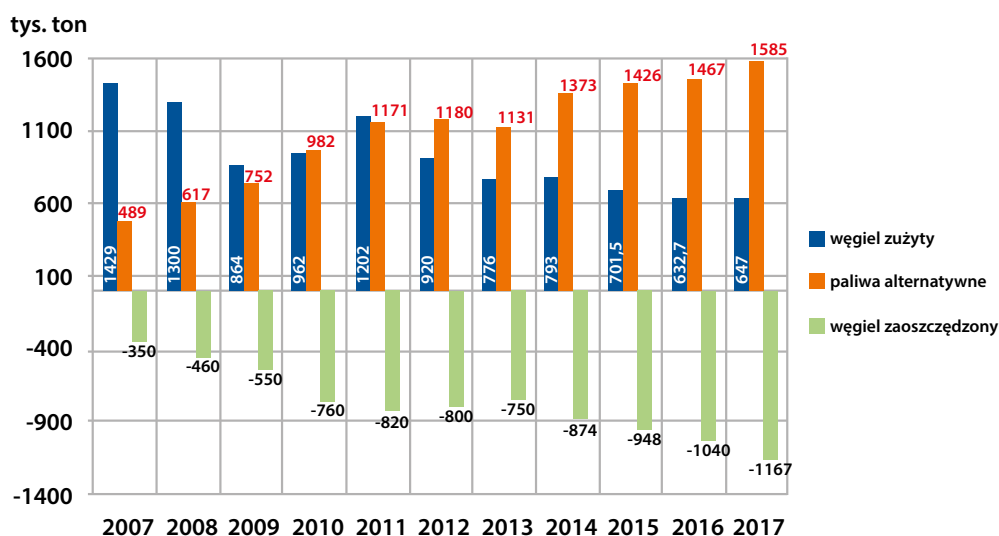
W instalacji pieca cementowego chlor jest składnikiem, który negatywnie wpływa na pracę pieca cementowego. Wprowadzanie zbyt dużych ilości chloru, fluoru czy alkaliów może zintensyfikować istniejące obiegi związków chloru, fluoru z alkaliami lub metalami w systemie pieca i w efekcie zakłócić jego prawidłową pracę. Związki chloru (KCl, NaCl) są odparowywane, unoszone i kondensują w chłodniejszych obszarach instalacji, np. w podgrzewaczu cyklonowym oraz na płynącym strumieniu mąki surowcowej. W najgorszym przypadku

mogą powstać narosty w cyklonach, rurociągach, czy w komorze wzniosowej podgrzewacza, które zakłócają lub uniemożliwiają przepływ materiału i gazów w systemie pieca. Poziom zawartości chloru w paliwach przygotowywanych z odpadów zawsze powinien odpowiadać warunkom zaakceptowanym dla danej instalacji piecowej, a jego ilość powinna wynikać z łącznego bilansu chloru wprowadzanego do instalacji piecowej.

#### Czy należy się obawiać emisji związków organicznych, w tym dioksyn z pieca cementowego?

Dioksyny powstają głównie przy niecałkowitym spalaniu substancji organicznych w obecności chloru. Mogą stanowić produkt uboczny zarówno naturalnych procesów spalania (np. pożarów lasu), jak i działalności człowieka (np. spalania odpadów i palenia ognisk). W celu skutecznego utlenienia związków organicznych niezbędny jest odpowiedni czas reakcji, temperatura i kontakt paliwa z powietrzem. Warunki panujące w piecu cementowym są wystarczające dla osiągnięcia zupełności spalania węglowodorów wielkocząsteczkowych, a także pozwalają na dechloryzację nawet najbardziej trwałych związków – przy tej metodzie spalania stopień rozkładu wielu niebezpiecznych odpadów jest bardzo wysoki, sięgający 99,999%. Dostawaniu się dioksyn do atmosfery zapobiega się przez sterowanie temperaturą procesu i szybkie chłodzenie gazów odlotowych w piecu cementowym. Badania prowadzone od wielu lat w tym zakresie wykazują, że zastąpienie węgla paliwami alternatywnymi nie ma wpływu na emisję dioksyn/furanów (PCDD/PCDF) z cementowni. Cementownie monitorują emisję dioksyn z kominą dwa do czterech razy do roku, pobierając próbki spalin przez określony w przepisach zadany okres. Pozwolenie zintegrowane cementowni określa wartość dopuszczalną emisji dioksyn na poziomie 0,1 ng/m<sup>3</sup> (1 nanogram to 1/1 000 000 000 część grama). Wyniki emisji z rzeczywistych pomiarów mieszczą się w przedziale od 1% do poniżej 10% wielkości standardu emisyjnego. Natomiast przy tej okazji warto podkreślić inny problem – spalania odpadów w domowym piecu na ruszcie, gdzie warunki spalania są nieodpowiednie (zbyt niska temperatura, zbyt krótki czas, złe wymieszanie paliwa z utleniaczem) i wtedy mogą powstawać

Rys. 3. Efektywne wykorzystanie zasobów paliw w przemyśle cementowym w Polsce



niebezpieczne produkty niecałkowitego spalania (np. trójchlorobenzen, czterochlorek węgla i inne zanieczyszczenia). Z przeprowadzonych badań wynika, że koncentracja tego typu związków z małego, pojedynczego pieca domowego, w którym spala się odpady, może być aż 5000 razy wyższa niż z dużego przemysłowego pieca.

### Czy zastąpienie węgla paliwami alternatywnymi w cementowniach przyczynia się do redukcji emisji CO<sub>2</sub>?

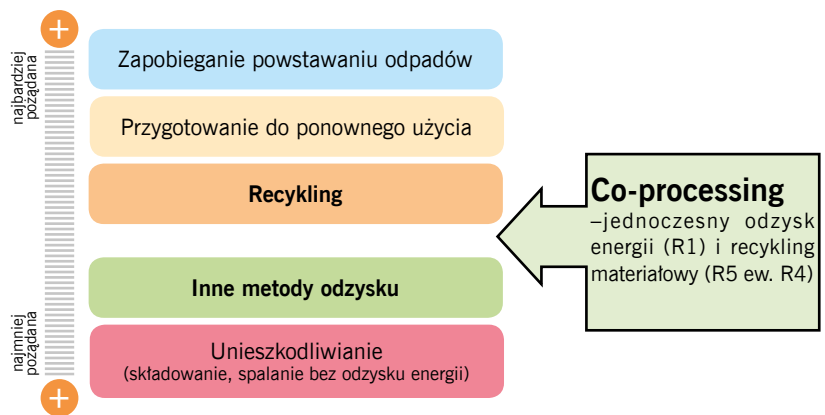
Węgiel kopalny zawiera w swoim składzie więcej węgla pierwiastkowego w porównaniu do odpadów (komunalnych czy przemysłowych) i dlatego przy jego spalaniu tworzy się większa ilość CO<sub>2</sub>. Ponadto, paliwa alternatywne mogą dodatkowo zawierać frakcję biomasową i to dodatkowo przyczynia się do redukcji emisji CO<sub>2</sub> z pieca cementowego. Zbadano, że w Polsce paliwa alternatywne mogą zawierać nawet powyżej 30% biomasy.

Dzięki wykorzystaniu paliw alternatywnych przemysł zużywa mniej paliw kopalnych. W całkowitym bilansie emisji gazów cieplarnianych zastępowanie węgla paliwem z odpadów oznacza, że te odpady nie trafiają na składowisko, stając się źródłem emisji takich gazów, lub nie zostaną spalane w innym miejscu, stanowiąc dodatkowe źródło emisji CO<sub>2</sub>.

### Na czym polega recykling materiałowy paliw alternatywnych?

Co-processing, czyli współprzetwarzanie paliw alternatywnych, to proces ich spalania, podczas którego ma miejsce odzysk energii chemicznej materiału w postaci ciepła i odzysk składników mineralnych popiołu. Piec cementowy jest unikalnym urządzeniem, w którym proces spiekania surowców odbywa się w obecności gazów odlotowych spalanej paliwa i dlatego co-processing może mieć miejsce.

Do produkcji klinkieru cementowego potrzebne są surowce dostarczające cztery główne składniki chemiczne, a mianowicie tlenek wapnia CaO, dwutlenek krzemu SiO<sub>2</sub>, oraz mniejsze ilości tlenku glinu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i tlenku żelaza Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Popiół z paliw alternatywnych składają się głównie z tych czterech tlenków oraz dodatkowo zawierają kilkanaście



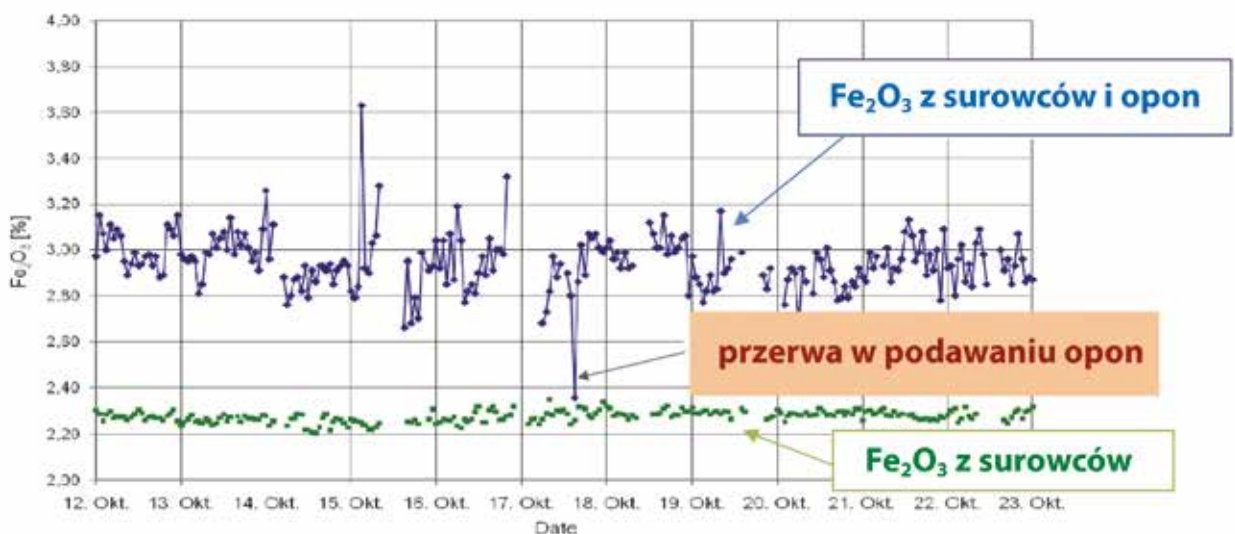
procent innych związków, które również typowo występują w klinkierze i nadają mu specyficzne właściwości, jak MgO i TiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O lub K<sub>2</sub>O, które powszechnie występują w skaleniach oraz SO<sub>3</sub>, który jest dodawany w celu wiązania Na<sub>2</sub>O lub K<sub>2</sub>O i tworzenia siarczanów alkalicznych. Mineralne składniki popiołu reagują w strefie spiekania ze składnikami zestawu surowcowego, wchodząc w skład wypalanej klinkieru. Oznacza to, że popiół z paliw alternatywnych nie jest kłopotliwym odpadem dla cementowni, tylko wartościowym dodatkiem do zestawu surowcowego, uzupełniając część surowca potrzebnego do produkcji klinkieru. W przypadku stosowania paliw alternatywnych cementownia musi modyfikować zestaw surowcowy, uwzględniając te dodatkowe związki chemiczne wprowadzane z paliwem alternatywnym. Wskaźniki recyklingu dla stałych paliw wtórnych są przedmiotem analiz i badań, z których wynika, że mogłyby mieścić się w zakresie od 13%, przy uwzględnieniu tylko 4 podstawowych tlenków, nawet do 18%, gdy uwzględni się pozostałe składniki popiołu.

Rys. 4. Co-processing paliw alternatywnych w hierarchii postępowania z odpadami jako kluczowym elemencie strategii gospodarki o obiegu zamkniętym

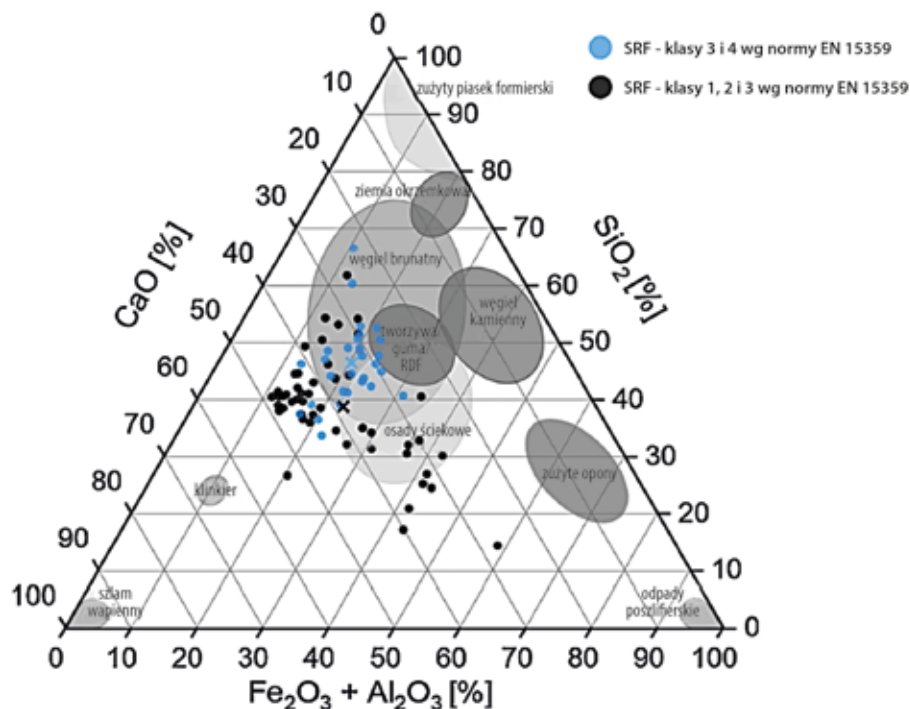
### Podsumowanie

Odpady są nieodłącznym elementem cyklu życia produktów, których używamy na co dzień. Najlepszym dla środowiska rozwiązaniem byłoby ograniczenie ich powstawania poprzez odpowiednie projektowanie wyrobów. Gdy odpady już powstają, powinny być wykorzystane ponownie – jako wartościowe źródło surowców i energii. Recykling

Rys. 5. Zawartość tlenku żelaza w klinkierze cementowym w przypadku współspalanych w piecu cementowym opon. Stawia on sumę tego tlenku pochodzącego zarówno z surowców, jak i z opon (źródło: VDZ)



Rys. 7. Porównanie składu popiołu 80 próbek paliw SRF z innymi paliwami i surowcami istotnymi dla przemysłu cementowego.  
 Źródło: Resources, Conservation & Recykling, 156 (2020)



materiałowy ma jednak swoje uwarunkowania i ograniczenia. Ten sposób przetwarzania odpadów nie oznacza wyłącznie powrotu do produktu wyjściowego - jest duża grupa odpadów, z których poprzez recykling nie można otrzymać produktu tej samej kategorii. Może także nie być rynku zbytu na produkty, które są wynikiem recyklingu. Często operacja recyklingu wymaga dużych nakładów energii i może być nieopłacalna ekonomicznie lub powodować wzrost śladu węglowego. Kiedy recykling materiałowy nie jest możliwy czy opłacalny, wtedy najlepszym rozwiązaniem jest odzysk termiczny. Wykorzystywanie paliw alternatywnych w przemyśle jako źródła energii stanowi obok recyklingu najlepsze rozwiązanie z punktu widzenia

środowiskowego i społecznego – zakłady już funkcjonują i społeczeństwo nie ponosi dodatkowych, często bardzo wysokich kosztów budowy nowych instalacji. Dla przemysłu ważne jest, aby funkcjonować w warunkach przewidywalnego prawodawstwa gwarantującego konkurencyjność i zapewniającego dostęp do surowców i energii. Efektywny system gospodarki odpadami w Polsce powinien uwzględniać istniejący potencjał przetwórczy odpadów, realne potrzeby w tym zakresie w przyszłości oraz wymagania, które trzeba będzie realizować w ramach planowanych strategii UE.

*dr inż. Bożena Środa  
 SPC*

