

---

**PRACE**

**Instytutu Ceramiki  
i Materiałów Budowlanych**

---

***Scientific Works***  
of Institute of Ceramics  
and Building Materials

---

**Nr 18**  
(lipiec–wrzesień)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus  
ISSN 1899-3230

**Rok VII**

**Warszawa–Opole 2014**

---

ANNA DUCZKOWSKA-KĄDZIEL\*  
JERZY DUDA\*\*

## Odpady komunalne i przemysłowe alternatywnymi surowcami i paliwami w procesie produkcji cementu

**Słowa kluczowe:** paliwa alternatywne, piec obrotowy, produkcja cementu.

Proces produkcji cementu stwarza duże możliwości wykorzystania odpadów jako zamienników naturalnych nieodnawialnych surowców kopalnianych. W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania odpadów w poszczególnych etapach produkcji cementu oraz jako paliwa w procesie wypalania klinkieru.

### 1. Wprowadzenie

Rozwojowi gospodarczemu kraju i wynikającemu z tego wzrostowi konsumpcji społeczeństwa towarzyszy negatywne dla środowiska zjawisko, jakim jest wzrost ilości odpadów przemysłowych i komunalnych. Problem utylizacji odpadów należy obecnie do podstawowych działań w Unii Europejskiej. Z ekologicznego punktu widzenia, kompleksowe rozwiązanie problemu odpadów przemysłowych jest realne jedynie przez stosowanie na szeroką skalę technologii bezodpadowych, tzw. czystych technologii. W związku z tym do głównych działań przemysłu należy obecnie rozwój innowacyjnych, czystych technologii. Mimo znacznego postępu w rozwoju technologii bezodpadowych oraz rozwoju technik recyklingu, co wpłynęło na istotne zmniejszenie ilości odpadów przemysłowych, aktualny jest ciągle problem ich utylizacji. Dotyczy to zwłaszcza odpadów komunalnych oraz osadów ściekowych. Występujący już brak terenów na składowiska odpadów komunalnych oraz ograniczone możliwości wykorzystania rolniczego lub składowania osadów ściekowych na składowiskach powodują, że poszukuje się innych metod ich likwidacji.

Jak wynika z doświadczeń państw byłej 15 UE, które wcześniej wprowadziły specjalne programy dotyczące produkcji bezodpadowej oraz zagospodarowania

---

\* Dr, Politechnika Opolska, a.duczowska-kadziel@po.opole.pl

\*\* Dr hab.inż., Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nysie, jerzyduda@onet.eu

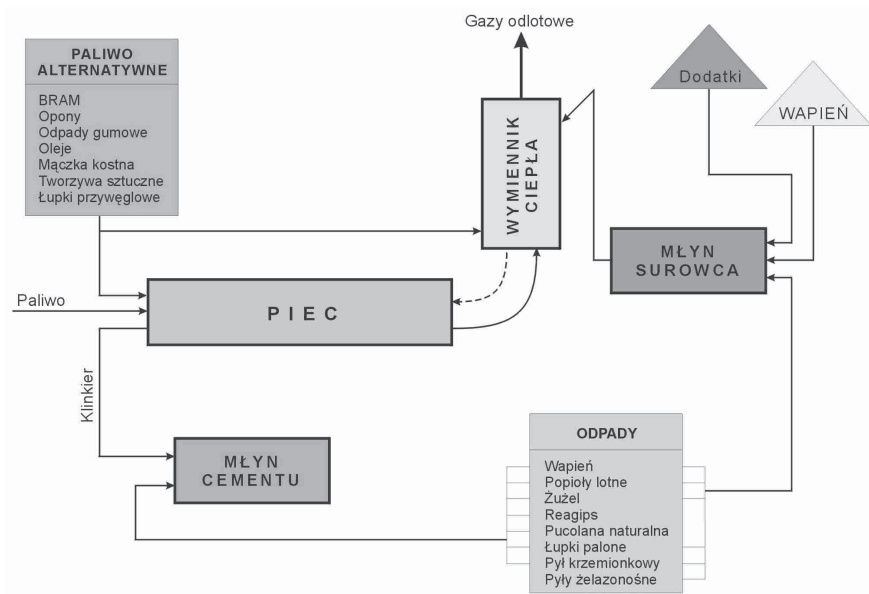
odpadów (recykling), znaczna ich część nie nadaje się do wtórnego wykorzystania i w związku z tym musi być degradowana, najczęściej termicznie. Spalanie odpadów jest często jedynym skutecznym sposobem ich likwidacji, zwłaszcza odpadów zawierających substancje organiczne. Aby proces ten był przyjazny dla środowiska, musi być przeprowadzony w odpowiednim urządzeniu zabezpieczającym warunki do termicznej utylizacji.

W ostatnich latach przemysł cementowy, który praktycznie sam nie wytwarza odpadów, aktywnie włączył się do rozwiązania problemu utylizacji odpadów z innych gałęzi przemysłu i komunalnych. Zainteresowanie problematyką wykorzystania odpadów wynika, z jednej strony, z dążenia do obniżenia kosztów produkcji (obniżenia zużycia węgla), a z drugiej, z występującego już braku lub złej jakości surowców naturalnych do produkcji cementu, zwłaszcza margli. Działalność taka jest zgodna z jedną z podstawowych zasad zrównoważonego rozwoju kraju, która zakłada racjonalne gospodarowanie nieodnawialnymi zasobami i zastępowanie ich substytutami z odpadów.

Proces technologiczny wytwarzania cementu, ze względu na wielkotonażową produkcję i wysoką energochłonność, należy do procesów uciążliwych dla środowiska. Wynika to między innymi z dużego zużycia surowców wapiennych (kopalnie surowców) oraz paliw – węgla kamiennego. Wysokotemperaturowy proces wypalania klinkieru cementowego stwarza naturalne warunki do wykorzystania palnych odpadów jako substytutu węgla kamiennego. Znaczna część takich odpadów, jak: popioły lotne z energetyki, żużel wielkopiecowy, pył krzemionkowy, łupki przywęglowe czy reagips z odsiarczania spalin, jest już dzisiaj powszechnie wykorzystywana w procesie produkcji cementu jako zamiennik surowców naturalnych-kopalnych, paliwa oraz jako dodatki do cementu. Oprócz korzyści ekonomicznych i środowiskowych, wynikających z wykorzystania w procesie produkcji cementu surowców odpadowych, dąży się do zmiany ciągle jeszcze panującego w społeczeństwie wizerunku cementowni jako zakładu szkodliwego dla środowiska naturalnego. Cementownie, które praktycznie nie wytwarzają odpadów, mogą spełniać ważną rolę w ochronie środowiska, wykorzystując odpady z innych procesów produkcyjnych i komunalne [2]. Korzyści dla środowiska ze stosowania odpadów w procesie produkcji cementu to m.in.:

- ograniczenie degradacji terenów rolniczych (zmniejszenie wydobycia surowców naturalnych i węgla);
- całkowite wykorzystanie niepalnych części odpadów paliw alternatywnych (wyeliminowanie składowania produktów spalania – żużla, popiołu);
- zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych.

Na rycinie 1 przedstawiono rodzaje stosowanych odpadów oraz możliwe sposoby ich wykorzystania w procesie produkcji cementu [3].



Ryc.1. Sposoby wykorzystania odpadów w procesie produkcji [3]

Wysoka energochłonność i wysokie zużycie surowców wapiennych nieodnawialnych w produkcji cementu wymaga realizacji efektywnego gospodarowania tymi zasobami zgodnie z polityką zrównoważonego rozwoju. Działalność taka ukierunkowana jest głównie na:

- zwiększenie udziału w produkcji odnawialnych surowców i paliw,
- promowanie alternatywnych źródeł energii i efektywnego ich wykorzystania,
- zmniejszenie szkodliwego oddziaływania procesów wytwarzania i użytkowania paliw i energii na środowisko.

## 2. Wykorzystanie odpadów jako zamiennika surowców naturalnych

Jednym z istotnych czynników, który powoduje, że przemysł cementowy aktywnie włączył się w rozwiązanie problemu odpadów jest spełnienie warunków wielkości emisji wynikających z coraz ostrzejszych norm ochrony środowiska, zdefiniowanych w BREF 2013 (BAT Reference Document – najlepsze dostępne techniki niepowodujące nadmiernego wzrostu kosztów, przeciwdziałające lub zmniejszające zanieczyszczenie powietrza) [8]. Dotyczy to zwłaszcza emisji NO<sub>x</sub> oraz CO<sub>2</sub>.

Zagadnienia dotyczące obniżenia energochłonności, ograniczenia szkodliwych emisji oraz wykorzystania w procesie produkcji cementu surowców i paliw z odpadów należą obecnie do głównych działań przemysłu, zgodnych z wymaga-

niami pakietu klimatyczno-energetycznego 3 x 20. W wyniku przeprowadzonej w ostatnich latach modernizacji cementowni w kraju, poziom techniczny oraz uzyskiwane wskaźniki technologiczne i wielkości emisji odpowiadają w większości najlepszym technikom BAT. Problemem, przed którym stoi obecnie przemysł cementowy, jest konieczność dalszego ograniczenia energochłonności i emisji CO<sub>2</sub>. Przeprowadzona w ostatnich latach modernizacja przemysłu cementowego w Polsce (głównie procesu wypalania klinkieru) spowodowała, że dalsze działania zgodne z pakietem klimatycznym są już bardzo ograniczone lub nieopłacalne, przy obecnym poziomie technicznym. W związku z tym należy poszukiwać innych pośrednich metod, które pozwolą na dalsze obniżenie energochłonności procesu i emisji gazów cieplarnianych.

Poprawę efektywności energetycznej oraz zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub> można uzyskać poprzez:

- obniżenie udziału klinkieru w cemencie,
- wykorzystanie w procesie paliw i surowców odpadowych,
- zagospodarowanie ciepła odpadowego,
- stosowanie nowych technik wypalania.

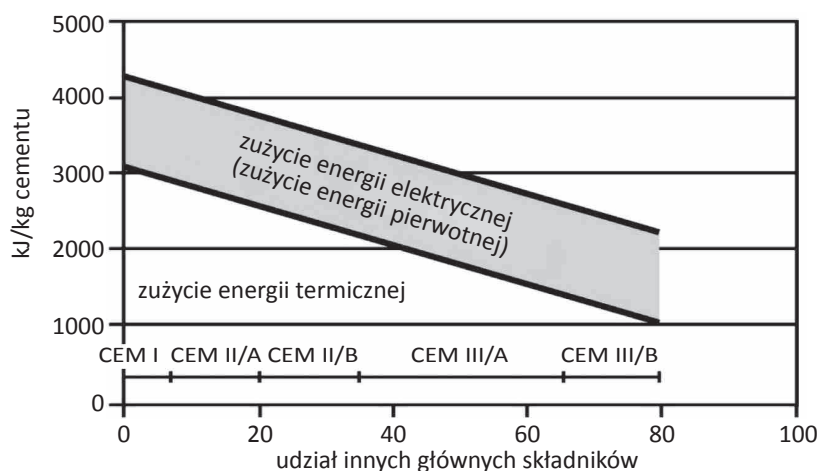
We wszystkich tych sposobach ważną rolę mogą odgrywać surowce i paliwa odpadowe. Obecnie jednym z najczęściej stosowanych sposobów obniżenia energochłonności i emisji CO<sub>2</sub> jest modyfikacja składu fazowego, która polega na ograniczeniu w klinkierze C<sub>3</sub>S (alitu) kosztem C<sub>2</sub>S (belitu) i C<sub>4</sub>AF (braunmillerytu) lub ograniczenie klinkieru w cemencie. W tabeli 1 przedstawiono nowe rodzaje cementów oraz dopuszczalną (zgodnie z polską normą PN-B-19701) ilość dodatków w cemencie.

Tabela 1

Dopuszczalna zawartość dodatków w cementach wg PN-EN 197-1:2002

Nazwa cementu	Symbol cementu	Rodzaj dodatku	Ilość dodatków %
Cement portlandzki	CEM I	Gips	0 ÷ 5
Cement portlandzki żuźłowy	CEM II/A-S	Żuźel S	6 ÷ 20
	CEM II/B-S		21 ÷ 35
Cement portlandzki krzemionkowy	CEM II/A-D	Pył krzemionkowy D	6 ÷ 10
	CEM II/A-P		6 ÷ 20
Cement portlandzki pucolanowy	CEM II/B-P	Pucolana naturalna P, pucolana przemysłowa Q	21 ÷ 35
	CEM II/A-Q		6 ÷ 20
	CEM II/B-Q		21 ÷ 35
Cement portlandzki popiołowy	CEM II/A-V	Popiół krzemionkowy V	6 ÷ 20
	CEM II/B-V		21 ÷ 35
	CEM II/A-W	Popiół wapienny W	6 ÷ 20
	CEM II/B-W		21 ÷ 35
Cement portlandzki wapienny	CEM II/A-L	Kamień wapienny L	6 ÷ 20
	CEM II/B-L		21 ÷ 35
Cement portlandzki żuźłowo- popiołowy	CEM II/A-SV	Żuźel S i popiół V	6 ÷ 20
	CEM II/B-SV		20 ÷ 40
Cement hutniczy	CEM III/A	Żuźel S	36 ÷ 65
	CEM III/B		66 ÷ 80
Cement pucolanowy	CEM IV/A	Popiół V	11 ÷ 35
	CEM IV/B		36 ÷ 55

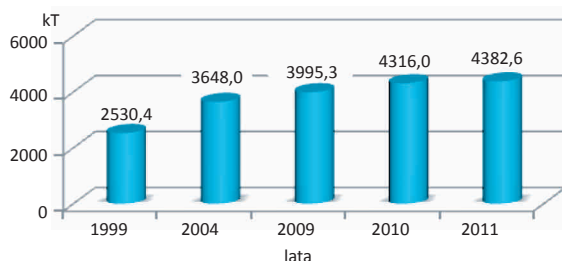
Najczęściej stosowanymi substytutami klinkieru w cemencie są: żużel wielkopiecowy, popioły lotne z energetyki oraz kamień wapienny. Nowym, coraz częściej stosowanym sposobem ograniczenia energochłonności i emisji CO<sub>2</sub> jest zastąpienie klinkieru spiekami o własnościach hydraulicznych, wytworzonym z surowców odpadowych o niższej zawartości wapna, z innych procesów technologicznych. Na rycinie 2 przedstawiono wpływ dodatków na energochłonność wytwarzania cementu.



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 2. Wpływ dodatków w cemencie na jego energochłonność [6]

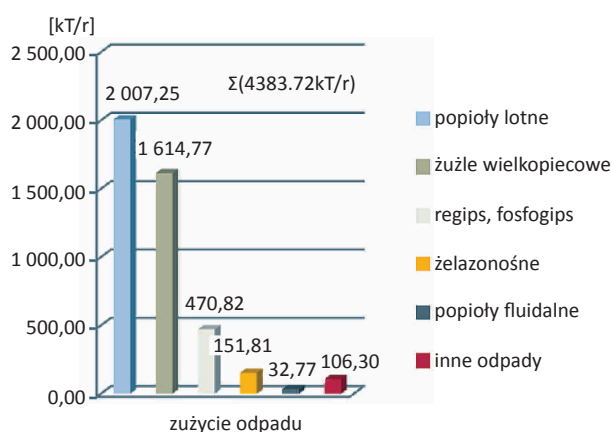
O pozytywnym działaniu przemysłu cementowego na rzecz środowiska naturalnego w Polsce świadczy ilość wykorzystywanych w procesie produkcji cementu i klinkieru odpadów przemysłowych oraz stały wzrost ich wykorzystania. Do podstawowych odpadów, które głównie są używane do produkcji cementu należą: popioły lotne, żużel wielkopiecowy, kamień wapienny i reagips. Jeszcze pod koniec lat 90. ubiegłego wieku, przemysł cementowy w Polsce wykorzystywał jako substytuty surowca i klinkieru ok. 2530 kT/rok odpadów. Natomiast już w 2011 r. ilość ta została prawie podwojona i wynosiła ok. 4400 kT/rok. Wzrósł również rodzaj wykorzystywanych odpadów. Te pozytywne zmiany w zakresie zużycia w procesie produkcji klinkieru i cementu surowców odpadowych z innych przemysłów przedstawiono na rycinie 3.



Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Ryc. 3. Zużycie surowców odpadowych do produkcji klinkieru i cementu

Natomiast na rycinie 4 przedstawiono rodzaje surowców odpadowych oraz poziom ich wykorzystania jako zamiennika surowców naturalnych i klinkieru w cemencie.



Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Ryc. 4. Zużycie surowców odpadowych do produkcji cementu w 2011 r.

Produkcja nowych gatunków cementu (zgodnie z PN-EN 197-1:2002) znacznie rozszerzyła możliwość wykorzystania surowców odpadowych. Pozwoliło to na rozwiązanie trudnego problemu zagospodarowania szkodliwych dla środowiska odpadów przemysłowych oraz na produkcję cementów specjalnych (np. cementów belitowych, belitowo-pucolanowych czy cementu z siarczanu wapniowego) [1, 3].

### 3. Wykorzystanie w procesie wypalania klinkieru paliw z odpadów

Jak wynika z doświadczeń światowych oraz zgodnie z dyrektywą UE, termiczna utylizacja odpadów jest jednym z najskuteczniejszych sposobów likwidacji odpadów, zwłaszcza zawierających substancje organiczne. Można zgodzić się z przeciwnikami spalania odpadów, którzy twierdzą, że należy:

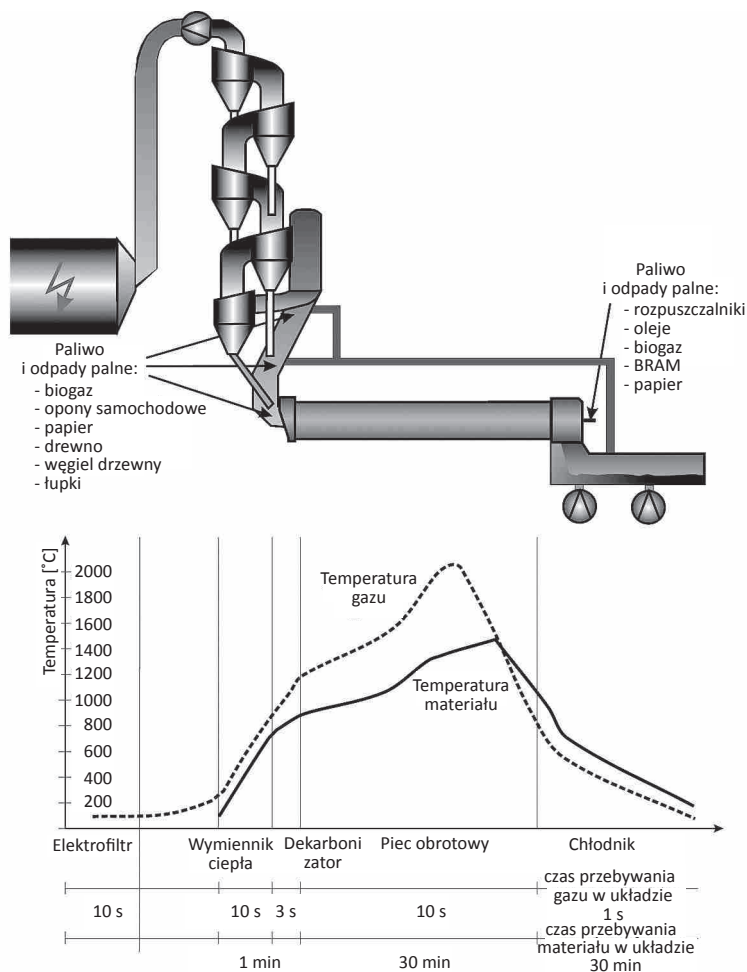
- rozwijać technologie bezodpadowe,
- ograniczać wytwarzanie odpadów,
- przetwarzać i unieszkodliwiać odpady przed składowaniem.

Pomimo rozwoju nowych technologii bezodpadowych oraz technik recyklingu i zagospodarowania wysegregowanych odpadów komunalnych, znaczna ilość odpadów wymaga deponowania na składowiskach odpadów. Występujący już brak możliwości składowania odpadów oraz protesty mieszkańców dotyczące budowy nowych lub rozbudowy istniejących składowisk powoduje, że rozwijane są metody termicznej utylizacji. Jednym z najprostszych sposobów termicznej utylizacji odpadów, ale zarazem wymagającym zgody społeczności lokalnej i znacznych nakładów finansowych, jest budowa typowej spalarni odpadów. Do spalania odpadów w spalarniach wykorzystuje się najczęściej piece z rusztem mechanicznym lub obrotowe. W nowych technikach wykorzystuje się metody zgazowania odpadów i techniki plazmowe. Jednym ze skutecznych sposobów likwidacji odpadów palnych jest produkcja na ich bazie paliw alternatywnych, które mogą stanowić częściowy zamiennik paliwa nieodnawialnego – kopalnego w procesach współspalania, np. w kotłach energetycznych czy w piecach obrotowych.

Wspólną wadą termicznej utylizacji odpadów w spalarniach zawodowych jest wprowadzenie do środowiska, oprócz zanieczyszczeń gazowych, takich jak:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$  i  $\text{NO}_x$ , dodatkowo popiołu, pyłów z urządzeń odpylających lub szlamów z urządzeń chemicznego oczyszczania gazów odlotowych. Stałe produkty spalania odpadów (żużel i popioły), często zawierające metale ciężkie, wymagają składowania lub dodatkowo – ze względu na zawartość metali ciężkich – witrafikacji. W związku z tym coraz częściej poszukuje się innych tańszych i bezpiecznych dla środowiska technik spalania odpadów. Procesem spełniającym te wymagania jest wysokotemperaturowy proces wypalania klinkieru cementowego w piecu obrotowym [3].

Piec obrotowy, ze względu na naturalne warunki temperaturowe oraz atmosferę gazową i czas przebywania spalin w wysokich temperaturach, jest urządzeniem konkurencyjnym dla typowej spalarni odpadów. Na rycinie 5 przedstawiono schemat technologiczny nowoczesnego pieca obrotowego wraz z rozkładem temperatury oraz czasem przebywania gazów i materiału w tych temperaturach.





Ryc. 5. Rozkład temperatury gazów i materiału w piecu obrotowym [4]

Szczególnie korzystne warunki do współspalania paliw alternatywnych z odpadów panują w piecach metody suchej z zewnętrznymi wymiennikami ciepła. Nowoczesne technologie wypalania w piecach z cyklonowymi wymiennikami ciepła oraz układami wstępnej dekarbonizacji – precalcynatorami, pozwalają na spalanie w nich różnego rodzaju paliw niskokalorycznych lub odpadów palnych [5, 7]. Warunki temperaturowe w piecu obrotowym oraz możliwość dozowania paliwa alternatywnego w różne jego strefy (zgodnie z ryc. 5), pozwalają na stosowanie paliw o różnych postaciach fizycznych – płynnych, kawałkowych i pylistych.

W procesie termicznej utylizacji odpadów podstawowym zagadnieniem jest emisja gazów szkodliwych – dioksyn i furanów. Wysokie temperatury strumienia

gazów ( $> 2250$  K) i wypalanego materiału (ok. 1720 K), turbulencja i czas przepływu gazów oraz materiału w strefie wysokich temperatur ( $> 1400$  K) powodują, że proces współspalania paliw alternatywnych z pyłem węglowym w cementowym piecu obrotowym spełnia wszystkie wymagania związane z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z 21 marca 2002 r., dotyczącym prowadzenia procesu termicznego przekształcenia odpadów (Dz.U. nr 37, poz. 339). Spełnia on również warunki co do destrukcji związków toksycznych PCDD i PCDF (dioksyn i furanów). Określona przez Dyrektywę Europejską wymagana temperatura gazów powyżej 1370 K i czas 2 s przebywania w tej temperaturze jest utrzymywany znacznie dłużej i wynosi ok. 10 s, bez względu na typ pieca i metodę wypalania. Wysokotemperaturowy proces wypalania klinkieru i wielkość komory spalania powodują, że problem emisji dioksyn praktycznie w tym procesie nie występuje. Również sposób wykorzystania entalpii gazów piecowych w zewnętrznym, cyklonowym, wymienniku ciepła nie sprzyjają rekombinacji i tzw. syntezie De Novo [3, 7].

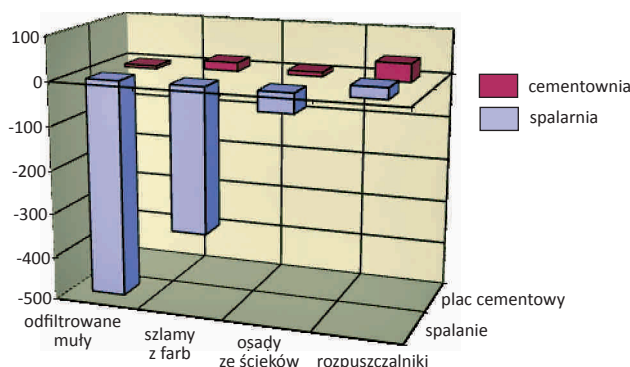
Oprócz korzystnego rozkładu temperatur, piec obrotowy w stosunku do typowej spalarni odpadów lub innego urządzenia do współspalania, posiada wiele dodatkowych zalet przemawiających za jego wykorzystaniem jako urządzenia do termicznej utylizacji odpadów. Do ważniejszych zalet można zaliczyć:

- alkaliczną atmosferę (neutralizacja gazów kwasotwórczych),
- całkowite wykorzystanie energii cieplnej z paliwa alternatywnego,
- dużą pojemność cieplną, zabezpieczającą ciągłość spalania w stanach awaryjnych,
- brak stałych produktów spalania (popiół całkowicie wchodzi w skład klinkieru),
- brak dodatkowego paleniska,
- niskie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne,
- wysoką sprawność urządzeń odpylających.

Przeprowadzone na wielu instalacjach spalania odpadów w różnych państwach (zwłaszcza w USA, Niemczech i w Holandii) badania destrukcji niebezpiecznych związków organicznych zawierających PCB, potwierdziły zalety cementowego pieca obrotowego. Uzyskiwany stopień rozkładu DRE (*destruction and removal efficiency factor*) niebezpiecznych związków organicznych PCB (polichlorowane bifenyle) w piecu obrotowym był bardzo wysoki i wynosił 99,99–99,9999%. Pozwoliło to w Stanach Zjednoczonych na spalanie w piecach obrotowych również paliwa z odpadów niebezpiecznych, zawierających np. PCB (węglowodory chlorowcowane, środki farmaceutyczne czy oleje transformatorowe) [7].

Zalety cementowego pieca obrotowego w porównaniu do zawodowej spalarni odpadów niebezpiecznych, potwierdziły również badania porównawcze, które

dotyczyły spalania czterech rodzajów odpadów: odfiltrowane muły, rozpuszczalniki, szlamy z farb i osady ze ścieków. Na rycinie 6 przedstawiono wyniki tych badań, które przeprowadziła – holenderska Organizacja Stosowanych Badań Naukowych.

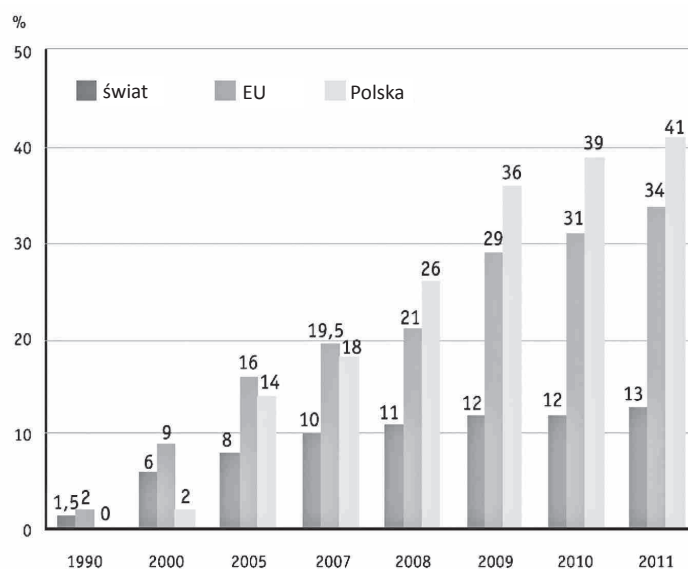


Ryc. 6. Wyniki testu porównawczego spalania odpadów w spalarni i cementowni [7]

Ocenię podlegało m.in.: oddziaływanie na środowisko, wpływ na zmniejszenie zużycia paliw i surowców naturalnych, toksyczność produktu spalania oraz efekt cieplarniany. Wpływ korzystny na wymienione parametry przedstawiono jako dodatni powyżej zera, natomiast oddziaływanie szkodliwe przedstawiono jako wynik ujemny. Z zaprezentowanych danych jednoznacznie wynika, że proces wypalania w piecu obrotowym jest zdecydowanie korzystniejszym sposobem destrukcji niebezpiecznych związków organicznych od spalania w spalarni odpadów niebezpiecznych.

Korzyści, zarówno ekonomiczne, jak i ekologiczne ze stosowania w procesie wypalania klinkieru paliw z odpadów, spowodowały bardzo intensywny rozwój technik wytwarzania i wykorzystania paliw alternatywnych w cementowniach. O ile jeszcze na początku lat 2000 przemysł cementowy w Polsce, pod względem wykorzystania odpadów przemysłowych jako zamiennika surowców naturalnych był porównywalny z przemysłem cementowym w UE, o tyle znacznie odbiegał pod względem wykorzystania paliw alternatywnych w procesie wypalania klinkieru. Udział paliw alternatywnych w procesie wypalania w cementowniach w Polsce był bardzo niski i zabezpieczał niecałe 2% zapotrzebowania ciepła. Odpowiednia informacja o korzyściach ekologicznych i ekonomicznych (konferencje i szkolenia, spotkania ze społeczeństwem) organizowane przez Instytut Mineralnych Materiałów Budowlanych w Opolu (obecnie Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział w Opolu) oraz Stowarzyszenie Producentów Cementu w Krakowie spowodowały, że obecnie

przemysł cementowy w Polsce jest liderem w EU i na świecie w wykorzystaniu paliw alternatywnych. Na rycinie 7 przedstawiono wykorzystanie paliw alternatywnych w cementowniach w Polsce w porównaniu do średniej wykorzystania w UE i na świecie.



Ryc. 7. Udział ciepła z paliw alternatywnych w procesie wypalania klinkieru [1]

Już w roku 2008 w Polsce średnie wykorzystanie paliw z odpadów w procesie wypalania klinkieru zabezpieczało ponad 26% zapotrzebowania ciepła i było wyższe od średniej unijnej. Natomiast w 2011 r., ponad 40% ciepła zabezpieczały paliwa z odpadów [1]. Nie jest to granica możliwości zastąpienia paliwa tradycyjnego – węgla w procesie wypalania klinkieru. Są już w kraju instalacje, w których średnio ponad 50% (max 80%) ciepła pochodzi ze spalania paliw alternatywnych.

#### 4. Sposób wykorzystania w procesie wypalania paliw z odpadów

Paliwa alternatywne z odpadów wykorzystywane w piecu obrotowym muszą – oprócz minimalnej wartości opałowej – spełniać dodatkowo wiele innych wymagań wynikających z technologii procesu wypalania klinkieru cementowego. Z technologicznego punktu widzenia paliwo alternatywne można scharakteryzować za pomocą:

- składu chemicznego i jego zmienności,

- własności fizycznych,
- wartości opałowej,
- składu chemicznego i własności stałych produktów spalania (popiołu).

W zależności od rodzaju odpadu i jego własności fizycznych oraz składu chemicznego, można przygotować odpowiednie dla danego pieca paliwo alternatywne, które pozwoli uzyskać dodatni efekt ekonomiczny i nie spowoduje zagrożenia dla jakości klinkieru i środowiska (wzrostu emisji pyłów i szkodliwych gazów).

W procesie wypalania klinkieru cementowego w kraju jako paliwo alternatywne najczęściej wykorzystuje się:

- zużyte opony samochodowe i odpady gumowe,
- wysegregowane odpady komunalne (tzw. RDF – *Refuse Derived Fuel*),
- osady ściekowe,
- mączki i tłuszcze zwierzęce.

Największym wykorzystaniem charakteryzują się paliwa z odpadów komunalnych oraz zużyte opony samochodowe. Prekursorem wykorzystania zużytych opon samochodowych jest firma Dyckerhoff, która uruchomiła pierwszą na świecie instalację dozowania całych zużytych opon samochodowych do pieca obrotowego. Opony w piecu obrotowym mogą być wykorzystane w całości lub rozdrobnione. Ze względu na możliwość wykorzystania całych opon, które poprzez specjalną śluzę wprowadzone są do komory wzniosowej i następnie do pieca obrotowego, jest to metoda najtańsza i bardzo korzystna zarówno ekonomicznie, jak i z punktu widzenia ekologicznego – całkowita termiczna likwidacja zużytych opon. Efekt ekologiczny, oprócz bezodpadowej utylizacji kłopotliwego odpadu, polega również na ograniczeniu zużycia nieodnawialnego źródła – węgla – oraz redukcji emisji gazów cieplarnianych – CO<sub>2</sub>.

Ograniczenie emisji dwutlenku węgla wynika z obniżenia zużycia węgla kamiennego, który charakteryzuje się wysokim (ok. 95 kgCO<sub>2</sub>/GJ) współczynnikiem emisji w stosunku do emisji ze spalania opon (ok. 85 kgCO<sub>2</sub>/GJ). Uwzględniając dodatkowo, że spalane opony zawierają średnio ok. 24% węgla (18,5% C w oponach samochodów osobowych i ponad 29% w oponach samochodów ciężarowych), który pochodzi z zawartego w oponach naturalnego kauczuku – biomasę, można przyjąć, że każdy GJ ciepła wytworzonego w piecu ze spalania zużytych opon pozwala dodatkowo ograniczyć emisję CO<sub>2</sub> w stosunku do emisji ze spalania węgla o ok. 40 kgCO<sub>2</sub>/GJ. Jak wynika z doświadczeń wykorzystania zużytych opon (całych nierozdrobnionych), maksymalny ich udział w procesie wypalania klinkieru odpowiada ok. 20% zapotrzebowania ciepła. Świadczy to o tym, że dzięki wykorzystaniu w procesie wypalania zużytych opon samo-

chodowych zamiast tradycyjnego paliwa technologicznego – węgla, uzyskuje się, oprócz efektów ekonomicznych (tańszy GJ ze spalania opon), znaczną (ok. 100 tys. Mg/r) redukcję emisji CO<sub>2</sub>.

Pierwszym pod względem wykorzystania paliwem alternatywnym są przetworzone odpady komunalne – RDF. Paliwa te mogą być użyte w procesie współspalania z pyłem węglowym w palniku głównym pieca oraz w tzw. wtórnym palniku w procesie wstępnej dekarbonizacji (w prekalcynatorze). Ze względu na wysoką zawartość wilgoci w paliwach RDF (udział biomasy) i wynikającą z tego niską (ok. 17 MJ/kg) wartość opałową, udział tych paliw w palniku głównym jest mocno ograniczony. Wynika to z konieczności zabezpieczenia odpowiedniej różnicy temperatur (> 400 K) w strefie spiekania, pomiędzy temperaturą wypalanego materiału a temperaturą gazów spalinowych. Aby ten warunek spełnić, wymagane jest zabezpieczenie minimalnej (wynikającej z udziału stosowanych paliw) wartości opałowej paliwa w palniku głównym, większej od 22 MJ/kg. Niższa wynikowa wartość paliwa w procesie współspalania w palniku głównym pieca obrotowego spowoduje spadek wydajności i wzrost zużycia ciepła. Udział paliwa RDF w procesie wypalania zależy od jego wartości opałowej. Jak wynika z krajowych doświadczeń, udział paliwa alternatywnego o wartości opałowej  $Q_d = 13$  MJ/kg pozwala zastąpić ok. 10% paliwa technologicznego – pyłu węglowego. Natomiast paliwo RDF o wartości  $Q_d = 18$  MJ/kg, pozwala zastąpić już ok. 20% węgla [4].

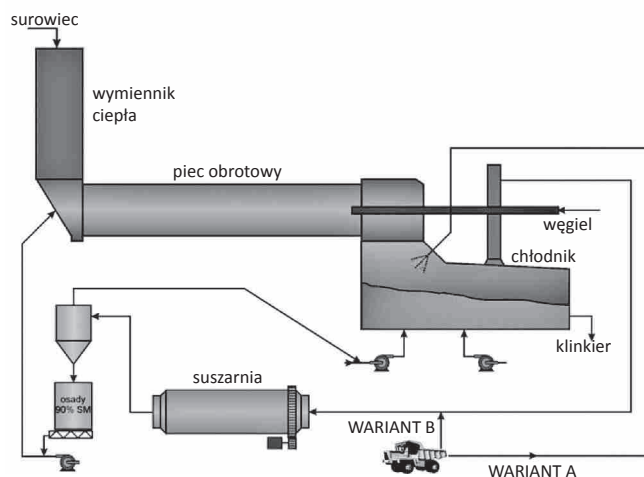
Uwzględniając efekty ekonomiczne i ekologiczne ze stosowania paliw z odpadów komunalnych, poszukuje się sposobów zwiększenia ich udziałów w procesie wypalania klinkieru. Coraz częściej spotyka się w cementowniach instalacje do podsuszania tych paliw i magazynowania w halach zadaszonych (zabezpieczenie przed opadami deszczu lub śniegu). Znacznie mniej problemów stwarza wykorzystanie tych paliw w procesie wstępnej dekarbonizacji w kalcynatorze. Wynika to z wymaganej w kalcynatorze niższej temperatury (ok. 1300 K). Warunki temperaturowe w kalcynatorze, wynikające z temperatury gazów z pieca (ok. 1350 K) oraz temperatury tzw. powietrza trzeciego (ok. 1100 K), zabezpieczają dobre warunki do spalania paliw o niższej wartości opałowej. W związku z tym, w procesie dekarbonizacji (kalcynatorze) wykorzystuje się zasadniczą część paliw alternatywnych.

Nowym, częściowo już stosowanym w niektórych cementowniach w kraju, paliwem są osady ściekowe z oczyszczalni ścieków komunalnych. Rozwój gospodarki wodno-ściekowej, a zwłaszcza budowa nowych oczyszczalni ścieków, spowodował znaczny wzrost osadów ściekowych. Jak wynika z prognoz Krajowego Programu Gospodarki Odpadami, należy w najbliższym czasie liczyć się z przyrostem rocznym osadów ściekowych na poziomie ok. 700 tys. Mg s.m. (w 2000 r. ilość ta wynosiła ok. 350 tys. Mg s.m.) Zasadniczy problem z zagospodarowo-

waniem osadów ściekowych wynika z nowelizacji Rozporządzenia o odpadach (Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z 12 czerwca 2007 r., Dz.U. nr 186, poz. 1553), która zgodnie z Dyrektywą 86/278/EEC (tzw. osadowa – The Sewage Sludge Directive) oraz Dyrektywą 99/31/EC, ogranicza rolnicze i pozarolnicze wykorzystanie osadów ściekowych oraz możliwość ich składowania na składowiskach odpadów.

Zgodnie z założeniami Krajowego Programu Gospodarki Odpadami, głównym po roku 2014 sposobem zagospodarowania osadów ściekowych (podobnie jak to jest już w krajach byłej 15 UE), będzie termiczne ich wykorzystanie. Spalanie w spalarniach zawodowych lub współspalanie w piecach przemysłowych, pozwalające na energetyczne wykorzystanie osadów ściekowych, jest najskuteczniejszym sposobem ich odzysku lub unieszkodliwienia. W związku z tym, konieczne będzie termiczne ich przetworzenie – suszenie, które pozwoli na wykorzystanie wysuszonych osadów (wartość opałowa ok. 14–18 MJ/kg) jako paliwa alternatywnego. Wyprodukowanie z osadów paliwa alternatywnego nie rozwiązuje problemu ich zagospodarowania – termicznej utylizacji. Z uwagi na dużą zawartość w osadach ściekowych azotu i siarki oraz metali ciężkich, instalacje do termicznej utylizacji muszą spełniać wiele warunków technicznych, które zabezpieczą środowisko przed szkodliwymi emisjami. Dla większości palenisk spalających osady ściekowe, dużym problemem będzie zagospodarowanie powstałego popiołu ze względu na zawartość w nim metali ciężkich. Aby popiół ten mógł być składowany na składowisku lub wykorzystany do produkcji materiałów budowlanych, wymagać on będzie energochłonnej wtryskiwarki.

Rozwiązaniem trudnego problemu zagospodarowania osadów ściekowych może być wykorzystanie osadów w procesie wypalania klinkieru w piecu obrotowym. Istniejące w cementowniach instalacje, wykorzystujące paliwa typu RDF, bez problemu można przestawić na dodatkowe paliwo z osadów ściekowych. W stosunku do innych metod termicznej utylizacji osadów, jak: spalanie w spalarni zawodowej lub w kotłach energetycznych, piec obrotowy, ze względu na wielkotonową produkcję i brak odpadów, jest bezkonkurencyjnym urządzeniem. Powstały po spaleniu osadów popiół, w stosunku do ilości produkowanego klinkieru, jest bardzo mały, co powoduje, że praktycznie nie ma wpływu na skład klinkieru. Dodatkową zaletą pieca obrotowego jest możliwość wykorzystania osadów o wysokim uwodnieniu, niewymagających suszenia. Ze względu na koszty instalacji suszenia osadów nie jest to rozwiązanie powszechnie stosowane w kraju. Tylko w kilku oczyszczalniach są lub będą w najbliższym czasie wybudowane suszarnie osadów. Na rycinie 8 przedstawiono sposób termicznej utylizacji osadów uwodnionych po prasach [5].



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 8. Schemat technologiczny wykorzystania osadów w cementowym piecu obrotowym

W przedstawionym rozwiązaniu wilgotne osady przed spaleniem zostaną wysuszone entalpią powietrza nadmiarowego w suszarni obrotowej (wariant B), która jest zainstalowana w tzw. by-passie chłodnika. Wysuszony granulaty z osadów można wykorzystać w palniku głównym pieca lub w procesie dekarbonizacji w kalcynatorze. Gazy (odór) po suszarni wprowadzony jest wentylatorem do chłodnika, gdzie ulega destrukcji. Układ taki nie wymaga żadnego filtra biologicznego, który jest niezbędny w typowej suszarni osadów ściekowych. Drugi sposób (wariant A) polega na wprowadzeniu wilgotnych osadów na gorący klinkier w chłodniku klinkieru. W zetknięciu z gorącym klinkierem następuje intensywny proces suszenia. Powstała frakcja stała i gazy wprowadzone są z powietrzem chłodzącym do pieca, gdzie ulegają spalaniu. W zależności od technologii współspalania, wytworzone na bazie osadu ściekowego paliwo może być odpowiednio przygotowane zarówno pod kątem wartości opałowej, jak i składu chemicznego popiołu.

## 5. Podsumowanie

Technologia produkcji cementu, a zwłaszcza wysokotemperaturowy proces wypalania klinkieru w piecu obrotowym stwarzają doskonałe warunki do wykorzystania surowców i paliw z odpadów. Rozwój nowych technologii produkcji cementu, jaki dokonał się w ostatnich latach spowodował, że przemysł ten nie tylko przestał być uciążliwy dla środowiska, ale dzięki wykorzystaniu w procesie odpadów przemysłowych i komunalnych, spełnia bardzo pożyteczną rolę w jego ochronie. Wykorzystanie w procesie produkcji cementu surowców i paliw z odpadów jako substytutów surowców i paliw naturalnych jest działaniem



zgodnym ze zrównoważonym rozwojem i z pakietem klimatycznym 3 x 20. Wynikiem stosowania w procesie produkcji cementu odpadów przemysłowych i komunalnych jest również obniżenie energochłonności procesu i ograniczenie emisji szkodliwych gazów.

W porównaniu z innymi metodami termicznej utylizacji, cementowy piec obrotowy posiada wiele zalet, które gwarantują bezpieczne dla środowiska spalanie różnych paliw alternatywnych. Spalanie w piecu obrotowym jest metodą bezodpadową, wszystkie produkty spalania (popiół i żużel) są absorbowane przez klinkier. Współspalanie paliw z odpadów w cementowym piecu obrotowym jest coraz częściej brane pod uwagę jako jeden z proekologicznych sposobów utylizacji odpadów nawet niebezpiecznych, tzw. hazardów.

## Literatura

- [1] B a l c e r e k A., Polski przemysł cementowy. Stan obecny i wyzwania, [w:] Materiały konferencji „Energia i środowisko”, Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Szczyrk 2014, maszynopis w posiadaniu autorów.
- [2] D u d a J., *Produkcja cementu a ekologia*, „Surowce i Maszyny Budowlane” 2002, nr 2, s. 4–6.
- [3] D u d a J., *Energooszczędne i proekologiczne techniki wypalania klinkieru cementowego*, „Prace Instytutu Mineralnych Materiałów Budowlanych” 2004, wyd. spec.
- [4] D u d a J., *Ekologiczne wykorzystanie paliw z odpadów w cementowni*, [w:] *Paliwa z odpadów*, red. J.W. Wandrasz i K. Pikoń, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2007, s. 355–362.
- [5] D u d a J., W a s i l e w s k i M., *Innowacyjna technologia utylizacji osadów ściekowych*, [w:] *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, red. R. Knosala, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2014, s. 68–77.
- [6] H o e n i g V., *Möglichkeiten zur Verminderung der Energieverbrauchs und der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Zementindustrie. Materiały konferencyjne*, „Prace Instytutu Mineralnych Materiałów Budowlanych” 2001, nr 31, s. 75–87.
- [7] H o i d a l e n O., *Liquid Organic Waste as Secondary Fuel*, „Thermie” 1992, s. 424–448.
- [8] (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide, Joint Research Centre, 2013, [www.eippcb.jrc.es.europa.eu](http://www.eippcb.jrc.es.europa.eu) (20.09.2014).

ANNA DUCZKOWSKA-KĄDZIEL  
JERZY DUDA

MUNICIPAL AND INDUSTRIAL WASTE USED AS ALTERNATIVE RAW  
MATERIALS AND FUELS IN CEMENT PRODUCTION PROCESS

**Keywords:** rotary kiln, Refuse Derived Fuel, cement production.

The process of cement production vast possibilities of utilizing waste as natural replacement of non – renewable mining raw materials. This article presents the methods of utilizing waste In each stage of cement production and use of waste as a fuel in the clinker burning process.