

---

**PRACE**

**Instytutu Ceramiki  
i Materiałów Budowlanych**

---

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

---

**Nr 15**  
(październik–grudzień)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus

ISSN 1899-3230

**Rok VI**

**Warszawa–Opole 2013**

---

WOJCIECH KALINOWSKI\*  
LUCYNA JANECKA\*\*

## Zakłócenia procesu wypalania klinkieru przy zwiększonym udziale paliw alternatywnych

**Słowa kluczowe:** piec obrotowy, paliwa alternatywne, składniki lotne.

Obok korzystnych efektów spalania paliw alternatywnych w piecach cementowych, wynikających głównie z utylizacji odpadów oraz obniżenia kosztów produkcji, występują zauważalne, a przy tym w większości niekorzystne, efekty technologiczne.

W artykule zwrócono uwagę na podstawowe zagrożenia dla technologii wypalania klinkieru związane z oddziaływaniem zwiększonego udziału paliw alternatywnych na kinetykę spalania paliw oraz obiegi składników lotnych.

### 1. Wprowadzenie

Paliwa alternatywne stałe (PAS) należą do grupy odpadów innych niż niebezpieczne o kodzie 19 12 10. Charakteryzują się one wysoką zawartością wilgoci, przekraczającą niekiedy 40%, zróżnicowanym składem morfologicznym, uzależnionym od rodzaju odpadów oraz stosunkowo niską wartością opałową. Paliwa te są zwykle także nośnikami składników lotnych, zwłaszcza chloru oraz zanieczyszczeń metalami ciężkimi, z których część wchodzi w skład klinkieru, a część (metale lotne – Hg, Tl, Cd) stanowi składnik emisji. W praktyce przemysłowej, dla utrzymania odpowiednich warunków termicznych w procesie wypalania klinkieru, paliwa alternatywne są spalane razem z paliwami konwencjonalnymi (tzw. współspalanie paliw) oraz wzbogacane odpadami wysokokalorycznymi, np. gumowymi. Wprowadzenie paliw alternatywnych jako składnika mieszaniny paliwowej wywołuje istotne, a przy tym w większości niekorzystne, zmiany w procesie spalania paliw.

---

\* Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, w.kalinowski@icimb.pl

\*\* Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, l.janecka@icimb.pl

## 2. Spalanie paliw alternatywnych

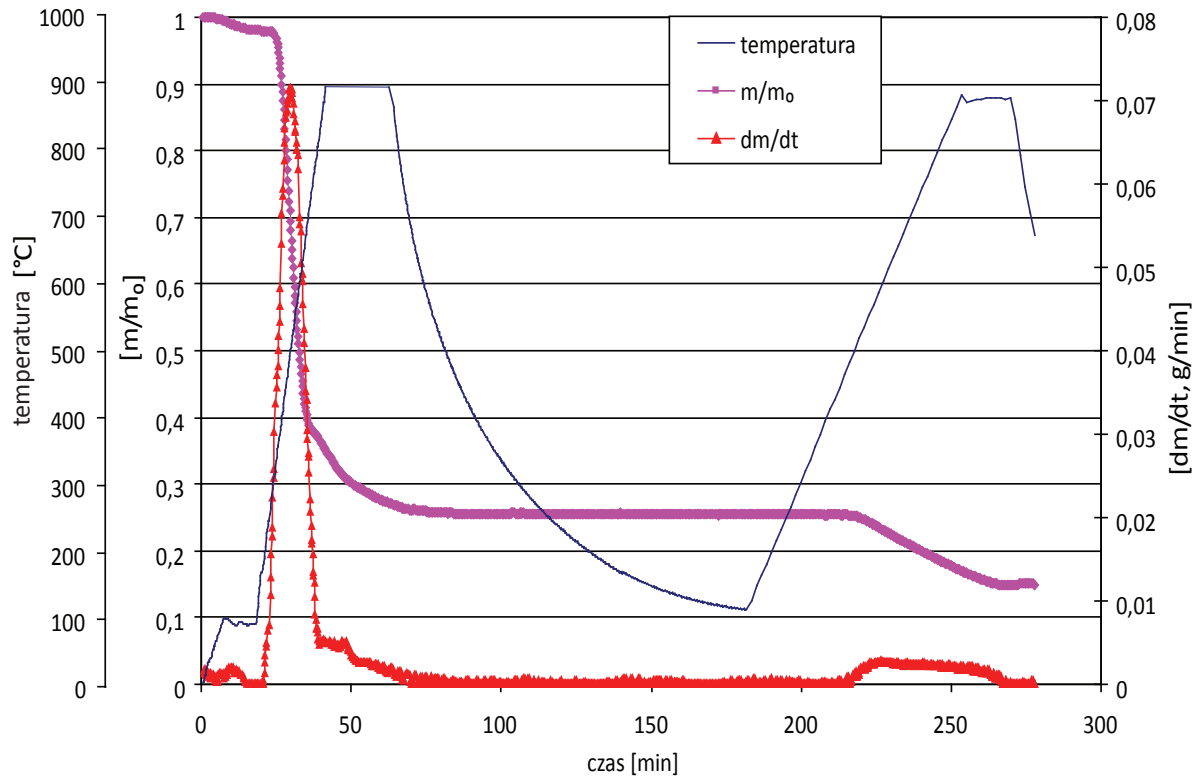
Inne właściwości paliw alternatywnych, w porównaniu z paliwem konwencjonalnym, zarówno pod względem cech fizycznych (wilgotność, wielkość i kształt ziaren, zawartość części lotnych), składu chemicznego, jak i warunków spalania (temperatura, zapotrzebowanie tlenu), wpływają na kinetykę spalania paliw i formowanie płomienia w palenisku pieca obrotowego. Zagadnienia te były przedmiotem badań kinetyki procesu spalania paliw alternatywnych w symulowanych warunkach palenisk układu wypalania klinkieru [1]. Rozkład temperatur gazu wzdłuż pieca, a więc także i intensywność wymiany ciepła pomiędzy gazami spalinowymi a wypalaniem materiałem, uzależniony jest od długości płomienia oraz jego temperatury. Są to elementy wpływające zarówno na reakcję dekarbonizacji surowca oraz na intensyfikację procesów klinkieryzacji, a więc na parametry decydujące o wydajności pieca. Na rycinie 1 przedstawiono przykładowe wyniki badań szybkości odgazowania części lotnych wybranej próbki paliwa alternatywnego 19 12 10. Badano wysuszone paliwo alternatywne o następujących właściwościach:

- zawartość wilgoci:  $W^a$  – 0,8%,
- zawartość popiołu:  $A^a$  – 14,5%,
- ciepło spalania:  $Q^a$  – 26745 kJ/kg,
- zawartość części lotnych:  $V^a$  – 70,0%.

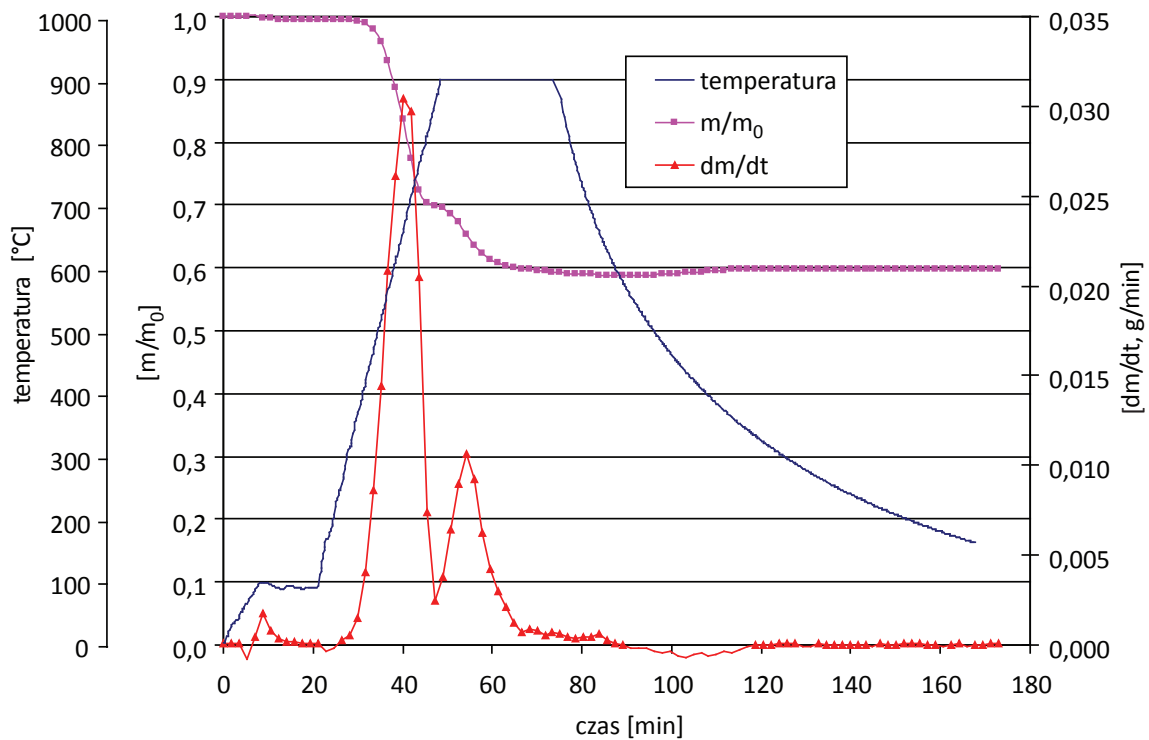
Do oznaczeń stałych kinetycznych szybkości odgazowania części lotnych i spalania pozostałości koksowej użyto techniki termogravimetrycznej. Próbkę paliwa ogrzewano według zadanej szybkości nagrzewania w kontrolowanej atmosferze azotu (zgazowanie) lub z kontrolowanym udziałem utleniacza (spalanie pozostałości koksowej). Równocześnie rejestrowano zmiany masy próbki.

Dla określenia wpływu pyłów wapiennych na charakterystykę procesu spalania wykonano badania kinetyki paliwa alternatywnego z domieszką częściowo skalcynowanej mąki surowcowej. Na rycinie 2 pokazano wykres zgazowania przykładowej próbki paliwa.

Warunki realizacji procesu spalania wpływają nie tylko na kinetykę reakcji, ale również na mechanizm spalania. Z porównania obu wykresów (ryc. 1 i 2) wynika, że obecność pyłu wapiennego wpływa na zmniejszenie szybkości wydzielania się części lotnych. Powoduje to wydłużenie czasów indukcji zapłonu, a więc także całkowitego czasu spalania. Pojawia się również dodatkowy pik związany z oddziaływaniem dodatku wapiennego.



Ryc. 1. Ubytek masy w funkcji temperatury ośrodka  
– paliwo alternatywne (powietrze) [2]



Ryc. 2. Ubytek masy w funkcji temperatury – paliwo alternatywne  
+ dodatek aktywnego CaO [2]

Czas spalania jest sumą czasu niezbędnego na zainicjowanie procesu spalania, spalenie części lotnych oraz wypalenie tzw. pozostałości koksowej [3]:

$$t_s = t_v + t_K \quad (1)$$

gdzie:

$t_s$  – czas spalania [s],

$t_v$  – czas spalania części lotnych [s],

$t_K$  – czas spalania koksu [s].

Z kinetyczno-dyfuzyjnej teorii spalania czas spalania pojedynczej cząstki koksowej paliwa rośnie z kwadratem jej średnicy [3]. Aby określić wpływ wielkości cząstek i atmosferę gazową na czasy spalania paliwa alternatywnego, wykonano badania dla ziaren o średnicy 0–0,5 mm dla dwóch koncentracji tlenu w gazach 21% i 7,0%. W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów.

Tabela 1

*Czas spalania cząstki paliwa alternatywnego (dla temperatury 1000 K) [2]*

d	7% tlenu			21% tlenu		
	$t_v$	$t_K$	$t_s$	$t_v$	$t_K$	$t_s$
[cm]	[s]			[s]		
0,050	0,5382	9,67	10,2081	0,5382	3,22	3,7615
0,045	0,4360	7,83	8,2686	0,4360	2,61	3,0468
0,040	0,3445	6,19	6,5332	0,3445	2,06	2,4074
0,035	0,2637	4,74	5,0020	0,2637	1,58	1,8432
0,030	0,1938	3,48	3,6749	0,1938	1,16	1,3542
0,025	0,1346	2,42	2,5520	0,1346	0,81	0,9404
0,020	0,0861	1,55	1,6333	0,0861	0,52	0,6018
0,015	0,0484	0,87	0,9187	0,0484	0,29	0,3385
0,010	0,0215	0,39	0,4083	0,0215	0,13	0,1505
0,005	0,0054	0,10	0,1021	0,0054	0,03	0,0376

Całkowity czas spalania mieszaniny cząstek odpadu w powietrzu w największym stopniu uzależniony jest od frakcji o największym rozmiarze ziaren. Dla badanych próbek będzie przekraczał nieznacznie 3,76 sekundy. Zmniejszenie udziału utleniacza do 7% zwiększa czas spalania niemal trzykrotnie. Jak wynika z przedstawionych wyników, warunki realizacji procesu spalania paliwa, a zwłaszcza udział utleniacza, sposób doprowadzenia powietrza do spalania (cechy konstrukcji palnika), mają decydujący wpływ na kształt i długość płomienia w piecu.

Wspólną cechą wszystkich niskoemisyjnych palników pieców cementowych, poza ograniczeniem ilości powietrza pierwotnego do spalania, jest wytwarzanie stref redukcyjnych w płomieniu. Pozwala to ograniczać emisje  $\text{NO}_x$  ze strefy

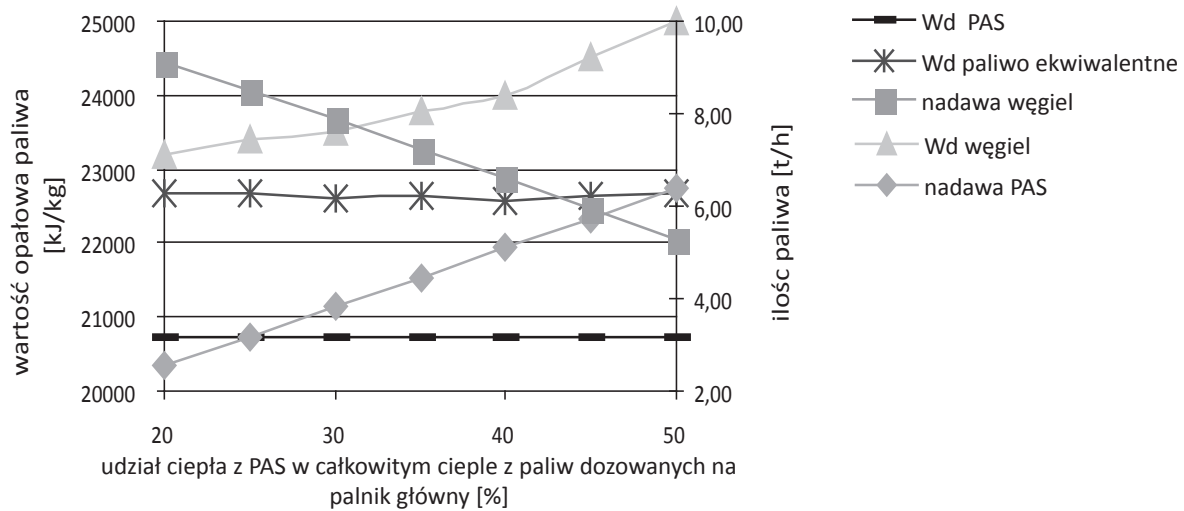
wysokotemperaturowej pieca, ale, jak wynika z przedstawionych wyników badań, powoduje wydłużenie czasów spalania paliwa.

Spalanie paliw alternatywnych jest procesem niejednorodnym, wynikającym z różnorodności składu, zmienności cech fizykochemicznych składników paliwa. Paliwo alternatywne trudno ulega zapłonowi oraz sam zapłon nie przebiega całkowicie. Zapłonowi w pierwszej fazie podlegają frakcje najdrobniejsze i lekkie – folie, ścinki papieru, części opakowań, itp., a następnie frakcje grubsze – guma, PVC, plastik, itp. Części mineralne oraz niektóre niepalne części stanowią balast i nie ulegają zapłonowi.

W warunkach współspalania paliwa alternatywnego z pyłem węglowym proces spalania dodatkowo się komplikuje. Kinetyka spalania węgla różni się istotnie od spalania paliw z odpadów. Gwałtowny zapłon drobnych suchych frakcji paliw alternatywnych zmienia warunki indukcji zapłonu węgla, co oddziałuje na następne fazy spalania węgla. Rosnący udział paliw alternatywnych w palniku głównym pieca powoduje wydłużenie płomienia, przesunięcie stref w kierunku wlotu materiału do pieca i podniesienie temperatury w tzw. zimnym końcu pieca. Praktyka przemysłowa potwierdza występowanie takich zjawisk.

Synteza związków chemicznych tworzących klinkier zachodzi z udziałem fazy ciekłej, co wymaga temperatury ok. 1450°C. Przy temperaturze płomienia sięgającej 2000°C występują korzystne warunki wymiany ciepła przez promieniowanie, a obracający się walczyk, granulując częściowo podtopiony materiał, sprzyja intensyfikacji tej wymiany. Kształt płomienia oraz jego temperatura mają decydujący wpływ na przebieg procesów technologicznych zachodzących w piecu. Podwyższenie temperatury płomienia powoduje zintensyfikowanie wymiany ciepła między gazami i wsadem, a w konsekwencji wzrost wydajności pieca. Obniżenie temperatury płomienia wpływa na spadek wydajności pieca i może doprowadzić do zwiększonego udziału materiału niecałkowicie przereagowanego w klinkierze.

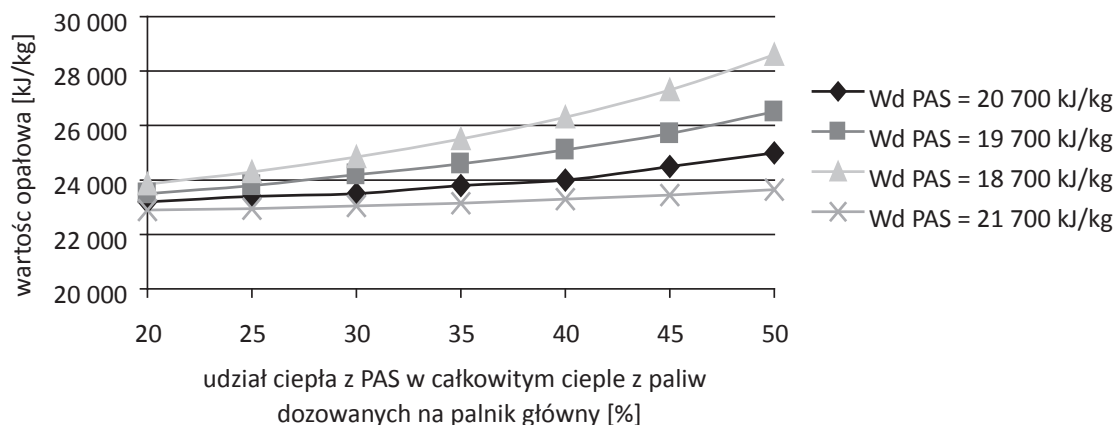
Dla zapewnienia odpowiednich warunków termicznych w strefie spiekania, typowych dla pieców obrotowych, minimalna wartość opałowa paliwa ekwiwalentnego wprowadzanego do palnika głównego nie powinna być zasadniczo niższa od 22–24 MJ/kg. Kaloryczność paliw alternatywnych zmienia się w szerokich zakresach, w zależności od rodzaju materiałów wchodzących w ich skład. Przeciętne wartości opałowe paliw alternatywnych PAS wahają się w granicach 18,5–21,5 MJ/kg. Pył węglowy stosowany do opalania pieców posiada zwykle wartość opałową na poziomie 24–26 MJ/kg w zależności od źródła pochodzenia. Na rycinach 3 i 4 przedstawiono wyniki przykładowych obliczeń udziału paliwa węglowego i paliwa alternatywnego w palniku pieca, dla utrzymania minimalnych warunków termicznych przy stałej kaloryczności mieszaniny paliwowej (udział paliw alternatywnych 20–50%).



Źródło: Badania własne.

Ryc. 3. Parametry paliw dozowanego do palnika głównego

Wraz ze wzrostem wartości opałowej PAS możliwe jest stosowanie paliwa węglowego o niższej wartości opałowej. I odwrotnie, dla rosnącego udziału paliw typu PAS w mieszaninie paliwowej i niskiej wartości opałowej tych paliw trzeba stosować lepsze jakościowo paliwo węglowe.



Źródło: Badania własne.

Ryc. 4. Minimalna wartość opałowa pyłu węglowego w funkcji udziału PAS w mieszance paliwowej

Zastosowanie nieprawidłowych rozwiązań technologicznych czy użycie nieodpowiednio dobranych odpadów może wpływać nie tylko na pogorszenie jakości produkowanego klinkieru, ale także oddziaływać niekorzystnie na stabilność procesu wypalania, zużycie energii oraz zwiększenie emisji składników szkodliwych do atmosfery.



### 3. Zakłócenia w procesie wypalania klinkieru

Najpoważniejszym zagrożeniem technologicznym, wynikającym z rosnącego udziału paliw alternatywnych, jest nadmierny wzrost koncentracji składników lotnych ( $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $Cl$ ,  $SO_3$ ), co stwarza niebezpieczeństwo powstawania narostów wewnątrz instalacji i blokowania spływu mąki surowcowej do pieca. Stosowanie paliw alternatywnych wiąże się przede wszystkim ze wzrostem  $Cl$  w procesie. W obecności chloru, zwiększa się lotność alkaliów, a obszar eutektyk ulega wyraźnemu rozszerzeniu, co zwiększa ryzyko zaklejania wymiennika cyklonowego [4].

O ile zawartość składników lotnych stosowanych w danym zakładzie surowcach jest znana i zwykle nie ma możliwości zmian w tym zakresie, to duża różnorodność paliw alternatywnych może być źródłem zakłóceń w procesie wypalania klinkieru. Alkalia, związki siarki oraz chloru wchodzące w skład mąki surowcowej oraz wprowadzane z paliwem pod wpływem temperatur panujących w piecu sublimują lub ulegają dysocjacji termicznej. Na ogół podaje się, że proces ten zachodzi w temperaturach powyżej  $1100^\circ C$  [5]. Według niektórych autorów [4, 6] zjawisko to zachodzi już w temperaturach powyżej  $700^\circ C$ . Ze wzrostem temperatury proces ten intensyfikuje się, aż do momentu pojawienia się większych ilości fazy ciekłej, co wpływa na zmniejszenie szybkości parowania. Odparowanie alkaliów z materiału w strefie spiekania jest znikome, tym mniejsze, im materiał zawiera więcej fazy ciekłej.

Do obliczeń obiegu składników lotnych wykorzystuje się metody rachunkowe opracowane przez Ritzmanna, Webera i Krefta na podstawie przeprowadzonych przez nich licznych badań przemysłowych [4, 7–9].

Z bilansu teoretycznego można ustalić ilości składników lotnych na wejściu do pieca, krążących w obiegu oraz pozostających w klinkierze. Opracowana metoda umożliwia dokonanie ilościowej oceny zjawiska dla zmieniających się ilości składników lotnych w surowcach, dodatkach korekcyjnych i paliwach. Składnikiem najważniejszym, który z uwagi na swą lotność i niskie temperatury topnienia swych związków w sposób decydujący przyczynia się do występowania różnorodnych zakłóceń, jest chlor.

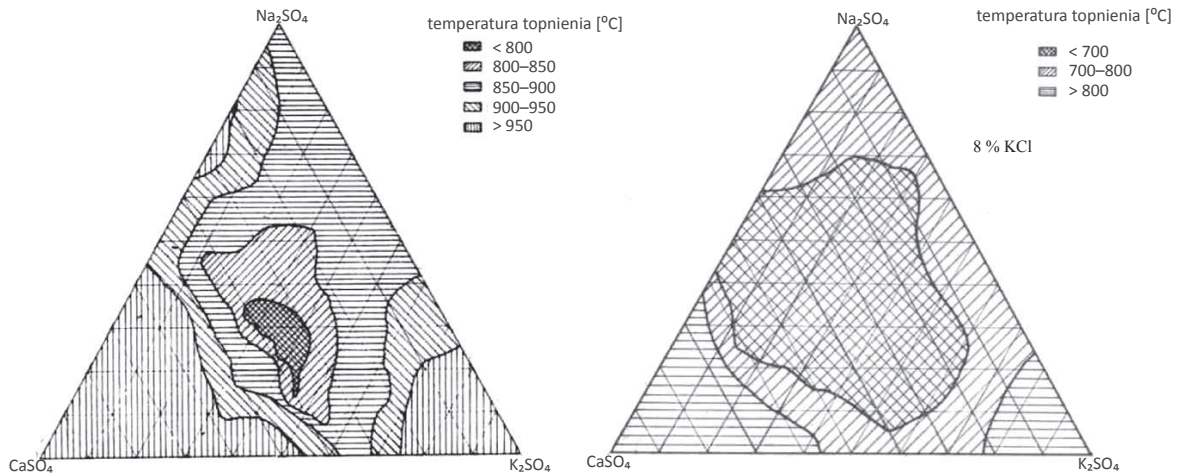
Występowanie fazy ciekłej w zakresie temperatur dolnych cyklonów wymiennika ciepła wiąże się głównie z powstawaniem eutektyk w układzie trójskładnikowym  $K_2SO_4$ - $KCl$ - $CaSO_4$ . Najniższe temperatury eutektyczne wynoszą  $650$ – $700^\circ C$ , a więc są niższe niż temperatura materiału na wlocie do pieca. Przy wyższej zawartości  $Cl$  wzrasta lotność alkaliów, obniża się temperatura powstawania fazy ciekłej i rośnie jej udział, co przedstawiono w tabeli 2 i na rycinie 5.



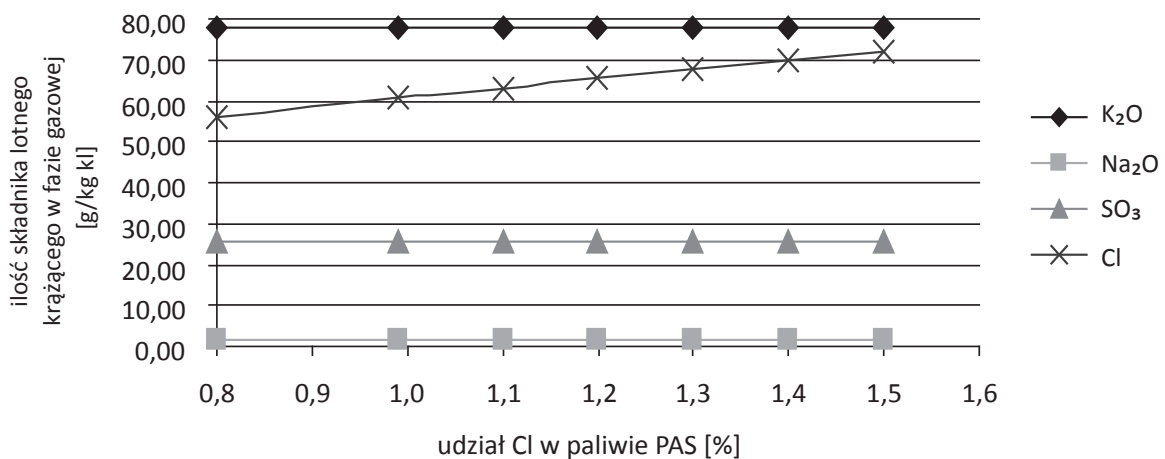
Tabela 2

Współczynniki lotności pierwotnej i wtórnej [10]

Składnik lotny	Lotność pierwotna bez Cl	Lotność pierwotna w obecności Cl	Lotność wtórna
K <sub>2</sub> O	0,4–0,6	0,6–0,8	0,9
Na <sub>2</sub> O	0,35–0,50	0,5–0,6	0,8
SO <sub>3</sub>	0,9	0,9	0,9
Cl <sub>2</sub>	–	1,0	1,0

Ryc. 5. Temperatury pojawiania się fazy ciekłej w układzie CaSO<sub>4</sub>-Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> [4]

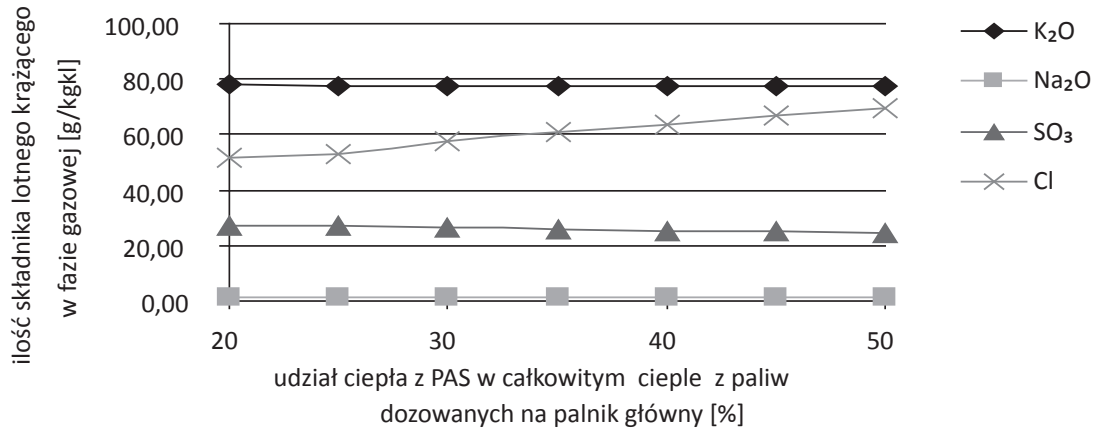
Na rycinie 6 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych wpływu wzrostu zawartości chloru w paliwach alternatywnych na ilość składników lotnych krążących w fazie gazowej.



Źródło: Badania własne.

Ryc. 6. Zawartość składników lotnych w fazie gazowej przy wzroście Cl w PAS

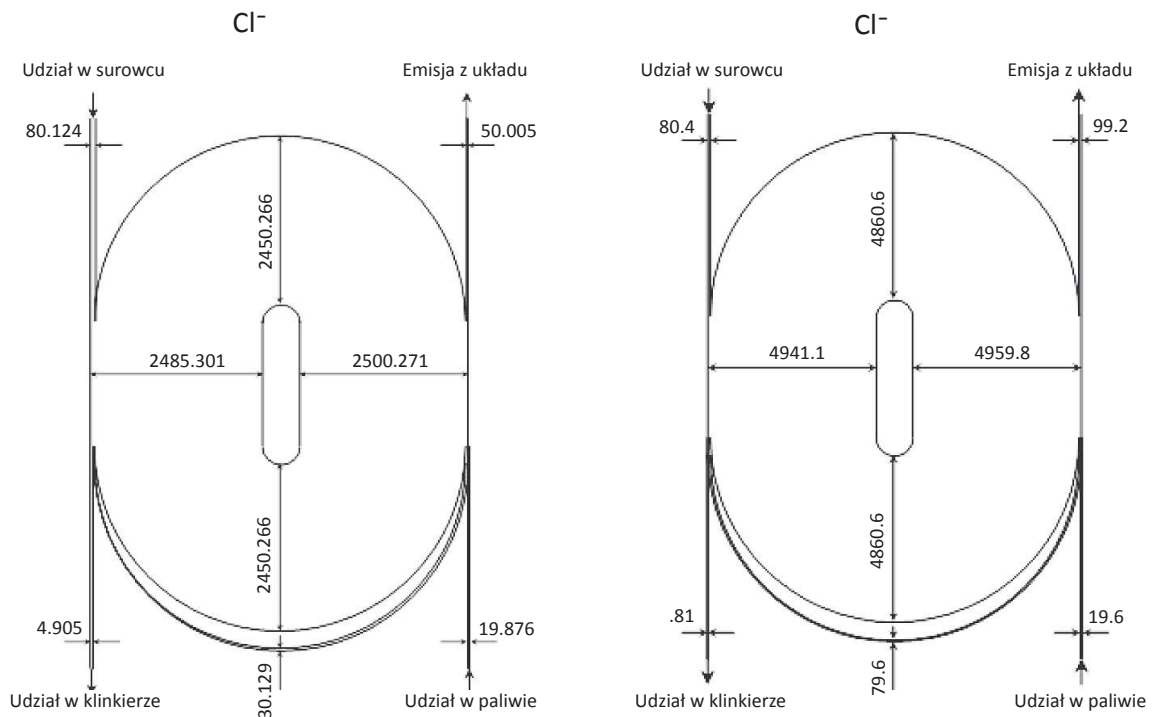
Rycina 7 obrazuje wpływ zmiennego udziału PAS w zakresie ok. 20–50% paliwa podawanego na palnik główny na ilość składników lotnych krążących w fazie gazowej.



Źródło: Badania własne.

Ryc. 7. Zawartość składników lotnych w fazie gazowej przy wzroście udziału PAS

Obliczenia symulacyjne wykazują również, że wzrost ilości paliwa alternatywnego w stosunku do węgla nie zawsze podwyższa współczynnik reakcji „r” według Krefta. Ma to miejsce wówczas, gdy paliwa alternatywne wprowadzają mniej K<sub>2</sub>O i SO<sub>3</sub> niż paliwo podstawowe.



Ryc. 8. Porównanie wyników bilansu chloru w instalacji suchej i półsuchej sposobu wytwarzania klinkieru [11]

Negatywne skutki technologiczne, zwłaszcza klejenie się materiału, mają związek z rosnącym udziałem Cl<sup>-</sup> w obiegu w fazie gazowej. Jak znaczny jest wzrost ilości chloru w fazie gazowej obrazują wykresy Sankeya przedstawione na rysunku 8. Wykresy zostały sporządzone w oparciu o wyniki obliczeń bilansu teoretycznego dla dwóch różnych układów technologicznych pieca cementowego.

Dla zmniejszenia koncentracji chloru w układzie wymiennika stosuje się bocznikowanie gazów tzw. bypass. Bocznikowanie najskuteczniej obniża zawartość chloru, najmniej sodu. Przy bocznikowaniu 5% gazów można usunąć w przybliżeniu 90% chlorków, ale nie więcej niż 15% alkaliów i SO<sub>3</sub>.

W celu scharakteryzowania procesu cyrkulacji substancji lotnych w układzie technologicznym pieca w warunkach przemysłowych konieczne jest określenie w oparciu o bilans rzeczywisty współczynników lotności E, cyrkulacji K i współczynników wiązania R [12]. Przykładowe wartości tych współczynników, oznaczone empirycznie z bilansów rzeczywistych obiegu, przedstawiono w tabeli 3. Wyniki te odnoszą się do rzeczywistych obiektów o różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych układów piecowych oraz o różnych rodzajach paliw.

Tabela 3

*Charakterystyka obiegów składników lotnych w różnych układach piecowych*

Układ piecowy/ rodzaj paliwa	Współczynnik reakcji r (bilans teoretyczny)	Parametr											
		lotność E				współczynnik obiegu K				współczynnik wiązania R			
		K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>
Układ A – węgiel kamienny	6,21	0,53	0,28	0,61	0,99	1,47	1,07	1,80	12,00	0,68	0,76	0,70	0,10
Układ A – węgiel + PAS + opony (1)	9,93	0,88	0,59	0,90	1,00	5,64	2,42	4,33	16,56	0,66	0,99	0,43	0,094
Układ A – węgiel + PAS + opony (2)	9,46	0,79	0,37	0,91	0,99	3,18	1,60	6,21	13,13	0,66	1,00	1,56	0,11
Układ B – węgiel + PAS	6,09	0,72	0,47	0,67	0,99	2,87	1,33	3,23	15,50	0,80	0,70	1,07	0,15
Układ C – węgiel kamienny	5,22	0,73	0,15	0,68	0,98	2,74	0,65	4,23	3,85	0,76	0,57	2,60	0,07
Układ C – węgiel kamienny + PAS	7,43	0,76	0,36	0,51	0,99	3,51	1,72	2,28	22,5	0,83	1,11	1,80	0,21

cd. tab. 3

Układ piecowy/ rodzaj paliwa	Współczynnik reakcji r (bilans teoretyczny)	Parametr											
		lotność E				współczynnik obiegu K				współczynnik wiązania R			
		K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>
Układ D – węgiel kamienny + PAS	12,82	0,59	0,15	0,28	0,97	1,06	1,32	1,18	3,15	0,80	1,12	0,84	0,09
Układ E – węgiel kamienny	5,95	0,70	0,42	0,46	0,98	2,48	0,78	2,22	24,4	0,76	0,57	2,60	0,07

A – sucha metoda produkcji klinkieru, czterostopniowy wymiennik,

B – sucha metoda produkcji klinkieru, czterostopniowy wymiennik, kalcynator AS,

C – sucha metoda produkcji klinkieru, czterostopniowy wymiennik, kalcynator AT,

D – półsucha metoda produkcji klinkieru, wymiennik cyklonowy, bypass,

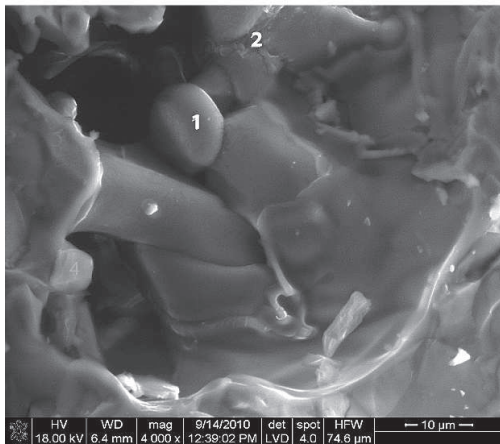
E – półmokra metoda produkcji klinkieru, wymiennik cyklonowy.

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

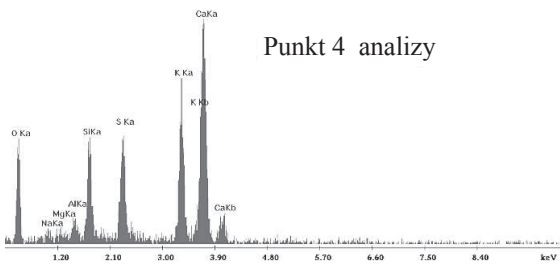
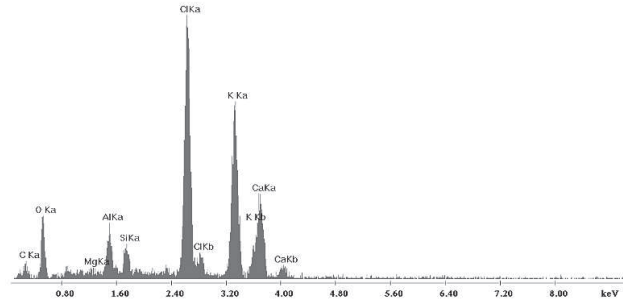
Jak wskazuje praktyka przemysłowa, wraz z rosnącą koncentracją składników lotnych w procesie, oprócz typowych zaburzeń procesu wypalania, jak klejenie się wymiennika i wlotu do pieca, mogą pojawić się również inne, jak tworzenie się brył i spieków wewnątrz pieca. Powstawanie brył i napieków w piecu łączy się zwykle z podwyższoną ilością składników lotnych w procesie oraz niestabilnością procesu wypalania. Zjawisku tworzenia się pierścieni i brył w piecu poświęcono wiele prac badawczych [5, 13–14], jednakże, jak dotąd, nie zostało ono rozpoznane w stopniu umożliwiającym podejmowanie skutecznych środków zapobiegawczych lub przydatnych w jego prognozowaniu.

W trakcie badań procesu wypalania klinkieru w instalacji, w której występowały zakłócenia pracy pieca (spieki, bryły) obserwowano szczególnie wysoką zawartość K<sub>2</sub>O i Cl w materiale wprowadzanym do pieca. Pobrane próby spieków poddano badaniom w mikroskopie skaningowym.

Na rycinach 9–11 pokazano obrazy SEM z mikroanalizą. Badane spieki charakteryzują się bardzo zwartą strukturą. Kryształy alitu i belitu w większości są mocno skorodowane i zatopione w dużej ilości fazy ciekłej, tworząc poligonalne zrosty o nieregularnych kształtach. Przestrzenie międzyziarnowe wypełnione są fazą ciekłą, powodując, że prawie niezauważalne są granice międzykrystaliczne alitu i belitu.

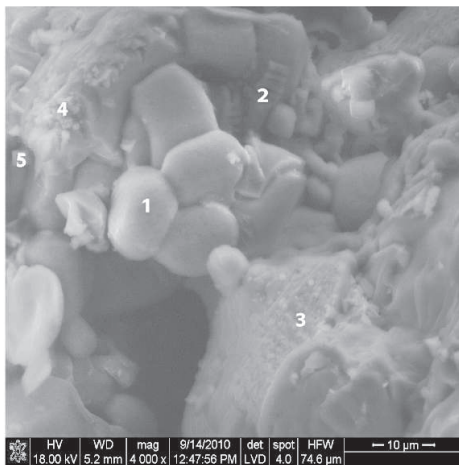


Punkt 2 analizy

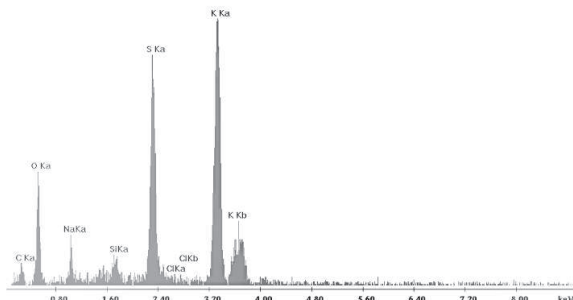


Punkt 4 analizy

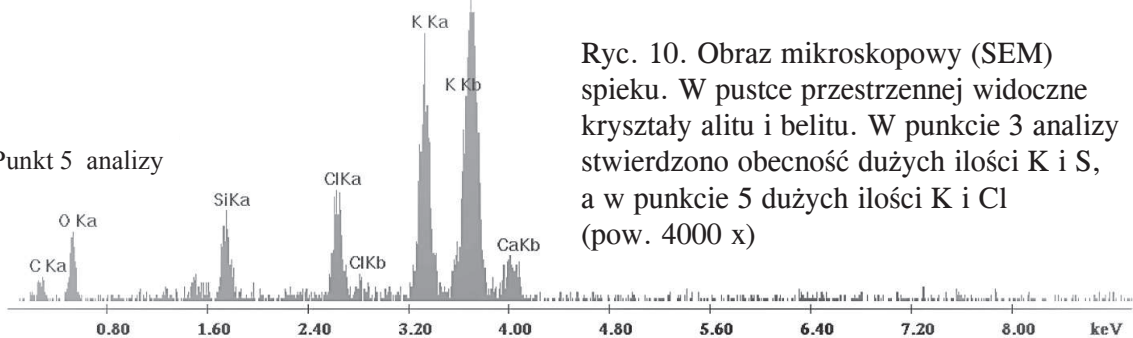
Ryc. 9. Obraz mikroskopowy (SEM) spieku. W pustce przestrzennej widoczne kryształy alitu i belitu. W punkcie 2 analizy stwierdzono obecność dużych ilości K i S, a w punkcie 4 dużych ilości K i Cl (pow. 4000 x)



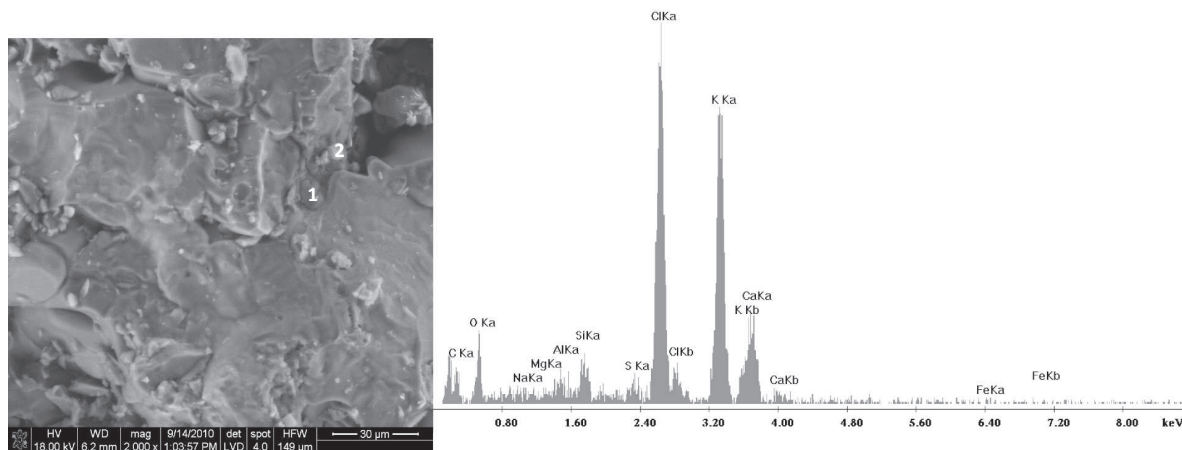
Punkt 3 analizy



Punkt 5 analizy



Ryc. 10. Obraz mikroskopowy (SEM) spieku. W pustce przestrzennej widoczne kryształy alitu i belitu. W punkcie 3 analizy stwierdzono obecność dużych ilości K i S, a w punkcie 5 dużych ilości K i Cl (pow. 4000 x)



Ryc. 11. Obraz mikroskopowy (SEM) spieku. Zwarta struktura. Kryształy alitu i belitu mocno skorodowane i zatopione w dużej ilości fazy ciekłej. W punkcie 2 analizy stwierdzono obecność dużych ilości K i Cl (pow. 2000 x)

W badanych próbach zidentyfikowano obszary, w których stwierdzono obecność dużych ilości K, S i Cl. Obecność alkaliów, siarczanów i chlorków powoduje pojawienie się eutektyk o temperaturze topnienia poniżej 700°C, co może w znacznym stopniu wpłynąć na powstanie dużych ilości fazy ciekłej powodującej tworzenie się brył klinkierowych.

W układach wielogłęziowych wymienników ciepła z dekarbonizatorami, przy występujących wahaniach składu paliw lub zakłóceniach w układzie ich dozowania, może dochodzić do zróżnicowanego, zmieniającego się w czasie, stopnia przygotowania mąki surowcowej na wlocie pieca. Jeżeli w takich warunkach do strefy wysokotemperaturowej dostanie się niejednorodny chemicznie materiał, zwłaszcza o niższym nasyceniu wapnem, to mogą utworzyć się lokalne ośrodki z podwyższoną zawartością fazy ciekłej. Przy lokalnie podwyższonej zawartości CaO mogą tworzyć się zbrylone spieki z tzw. niedopałem wewnątrz. Wytworzony w takich warunkach napiek jest nietrwały i w zmiennych warunkach spalania paliwa w piecu może się łatwo odrywać, stwarzając zagrożenie dla ciągłości procesu technologicznego. Obniżenie temperatury powstawania fazy ciekłej, ze względu na obecność alkaliów, może ten proces dodatkowo nasilać.

## 4. Podsumowanie

1. Paliwa alternatywne, chociaż są źródłem taniej energii, mogą być nośnikiem składników niepożądanych zarówno dla technologii wypalania klinkieru, jakości produktu, jak i mieć wpływ na wielkość i jakość emitowanych zanieczyszczeń. Praktyka przemysłowa wykazuje, że w zdecydowanej większości przypadków sytuacje awaryjne spowodowane są albo niestabilnością procesu wypalania, w tym zwłaszcza wynikającą ze spalania paliw alternatywnych, albo nadmierną koncentracją składników lotnych w układzie.



2. Niejednorodność paliwa alternatywnego, zróżnicowane zapotrzebowanie powietrza do spalania oraz zmiana mechanizmu zapłonu mieszaniny paliw alternatywnych z paliwem konwencjonalnym, powoduje istotne wydłużenie czasów spalania, zmianę kształtu, długości i parametrów płomienia oraz zmniejszenie wydajności pieca. Własności surowca oraz jakość i stabilność procesu wypalania wpływają na udział frakcji pyłowej w piecu. Jak pokazują przedstawione wyniki badań, obecność pyłu wapiennego w strefie płomienia oddziałuje również niekorzystnie na kinetykę spalania paliw.

3. Stosowanie paliw alternatywnych wiąże się ze wzrostem Cl w procesie wypalania klinkieru. Przy wyższej zawartości Cl wzrasta lotność alkaliów, obniża się temperatura powstawania fazy ciekłej oraz wzrasta koncentracja składników lotnych w obiegu. Zaburzenia pracy pieca, wynikające z niestabilności układów dozowania paliw wraz z nadmierną koncentracją składników lotnych w obiegu piec – kalcynator – wymiennik stanowią najczęstszą przyczynę zwiększonego tworzenia się napieków w instalacji wypalania klinkieru.

4. Nieprawidłowe rozwiązania techniczno-technologiczne, a w szczególności użycie nieodpowiednio dobranych paliw alternatywnych (zawartość metali ciężkich, chloru i alkaliów) może wpływać nie tylko na pogorszenie jakości produkowanego klinkieru, ale także oddziaływać niekorzystnie na stabilność procesu wypalania, zużycie energii oraz zwiększenie emisji składników szkodliwych do powietrza.

## Literatura

- [1] Kalinowski W., Moroń W., Rybak W., *Badania szybkości zgazowania odpadów dla warunków pieca cementowego*, [w:] *XV Sympozjum naukowo-techniczne: Kruszywa – cement – wapno*, Wyd. BMP Sp. z o.o., Racibórz 2008.
- [2] Moroń W., Rybak W., *Badania odgazowania części lotnych z odpadów w obecności mączki wapiennej*, Politechnika Wrocławska, Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów, Wrocław 2007.
- [3] Kordylewski W., *Spalanie i paliwa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
- [4] Ritzmann H., *Kreisläufe in Drehofensystemen*, „Zement – Kalk – Gips” 1971, Nr. 8.
- [5] Kurdowski W., *Poradnik technologa przemysłu ceramicznego*, Arkady, Warszawa 1981.
- [6] Sprung S., *Das Verhalten des Schwefels beim Brennen von Zementklinker*, Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf 1964.
- [7] Weber P., *Alkaliprobeme und Alkalibeseitigung bei wärmesparenden Trockendrehöfen*, „Zement – Kalk – Gips” 1964, Nr. 8.
- [8] Kref t W., *Methode zur Vorausberechnung von Schadstoffkreisläufen Zementöfen*, „Zement – Kalk – Gips” 1982, Nr. 9.



- [9] K r e f t W., *Alkali- und Schwefelverdampfung in Zementöfen in Gegenwart hoher Chloreinnahmen*, „Zement – Kalk – Gips” 1985, Nr. 8.
- [10] D u d a H., *Cement Data Book. International Process Engineering in the Cement Industry*, Bauverlag GmbH Wiesbaden, Berlin–London 1976.
- [11] J a n e c k a L., K a l i n o w s k i W., B u r s y G., Mechanizm i przyczyny powstawania napieków i narostów w zewnętrznych wymiennikach ciepła w półsuchej i suchej metodzie produkcji cementu. Praca IMMB, 1995 r.
- [12] F a r a g L.M., K a m e l H.M., *Effect of high intakes of chlorine, sulfur and alkalies on cement kiln operation*, „Zement – Kalk – Gips” 1994, Nr. 10.
- [13] N o w a k E. i in., *Zasady eksploatacji pieców obrotowych w procesie wypalania klinkieru cementowego*, „Prace Instytutu Mineralnych Materiałów Budowlanych” 1998, nr 22.
- [14] D u d a J., *Energooszczędne i proekologiczne techniki wypalania klinkieru cementowego*, „Prace Instytutu Mineralnych Materiałów Budowlanych” 2004, wyd. spec.

WOJCIECH KALINOWSKI  
LUCYNA JANECKA

#### DISTURBANCES OF CLINKER BURNING PROCESS WITH INCREASED SHARE OF ALTERNATIVE FUELS

**Keywords:** rotary kiln, alternative fuels, volatile matters.

Beside beneficial effects of combustion of alternative fuels in cement kilns resulting mainly from the utilization of waste and the reduction of production costs, there are noticeable, and at the same time mostly unfavorable, technological effects.

The article draws attention to the fundamental danger to the clinker burning technology associated with the impact of an increased share of alternative fuels to fuel combustion kinetics and to volatile matter cycle.