

JAROSŁAW TREMBACZ*
FRANCISZEK SŁADECZEK**

Biomasa jako źródło ciepła w piecach cementowych

W artykule omówiono właściwości wybranych paliw alternatywnych i biomasy, wykorzystywanych w piecach cementowych jako źródło ciepła przy współspalaniu z węglem. Wykonano obliczenia symulacyjne współspalania paliw PASr i PASi, przedstawiono bilans cieplny i masowy oraz wpływ współspalania biomasy na wydajność pieca, emisję CO₂ oraz pozostałe parametry technologiczne instalacji wypalania klinkieru.

1. Wprowadzenie

Zużycie energii w świecie ciągle rośnie. Potrzeby energetyczne gospodarek zaspokajane są głównie dzięki energii pochodzącej ze spalania paliw kopalnych, co powoduje ustawiczne zanieczyszczanie środowiska naturalnego. Świadomość wyczerpywania się paliw kopalnych oraz pogarszający się stan środowiska i zmiany klimatu spowodowały konieczność stosowania czystych ekologicznie źródeł energii. Do takich „czystych” paliw zalicza się m.in. biomasę, stanowiącą jedno z największych potencjalnych odnawialnych źródeł energii (OZE) na świecie, jak i w Polsce. Zwiększenie udziału energii odnawialnej powoduje znaczne obniżenie emisji gazów cieplarnianych (emisja gazów cieplarnianych z OZE jest niska lub zerowa).

Jednym z głównych źródeł wzrostu wykorzystania OZE będzie biomasa, która stanowi trzecie, co do wielkości na świecie, naturalne źródło energii, wykorzystywane tylko w 7%. Szacuje się, że w Polsce potencjał całkowity, możliwej do zagospodarowania biomasy, wynosi ok. 407,5 PJ [1].

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest określenie korzyści paliwowych i ekologicznych wynikających z używania biomasy w przemyśle cementowym. Zakres pracy obejmuje:

* Dr inż., Instytut Szkła, Ceramiki, Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Materiałowej, Procesowej i Środowiska w Opolu.

** Dr inż., Instytut Szkła, Ceramiki, Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Materiałowej, Procesowej i Środowiska w Opolu.

- analizę stosowanych paliw alternatywnych z uwzględnieniem udziału frakcji biomasy,
- obliczenia symulacyjne pracy układu wypalania klinkieru przy współspalaniu biomasy zawartej w paliwach alternatywnych.

3. Biomasa i paliwa alternatywne wykorzystywane w przemyśle cementowym

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Gospodarki (Dz.U. z 2008 r. nr 156, poz. 969) biomasa to stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej oraz leśnej, a także przemysłu przetwarzającego te produkty i części pozostałych odpadów, które ulegają biodegradacji.

Współspalania biomasy z węglem rozumiane jest jako zespół procesów polegających na spalaniu węgla z różnego rodzaju odpowiednio dobranymi biopaliwami stałymi lub produktami pochodzącymi z ich przetwórstwa. Jest to wykorzystanie odnawialnych źródeł energii z użytkowaniem energii z paliw kopalnych. Do najważniejszych korzyści wynikających ze spalania biomasy zalicza się:

- ograniczenie emisji gazów cieplarnianych i zmniejszenie opłat za korzystanie ze środowiska naturalnego,
- wykorzystanie lokalnych zasobów energetycznych,
- ograniczenie szkód w środowisku, które związane są z wydobyciem paliw kopalnych,
- efektywne zagospodarowanie odpadów, bez konieczności ich utylizacji bądź deponowania na składowiskach.

Piece do wypału klinkieru dzięki swojej konstrukcji oraz wysokotemperaturowemu procesowi spełniają wiele warunków, gwarantują całkowity rozkład termiczny spalanych paliw.

Paliwa alternatywne stosowane w przemyśle cementowym nie mogą zmieniać składu chemicznego wytwarzanego produktu. Dlatego też muszą spełniać określone dla danego rodzaju procesu technologicznego wymogi, ze względu na wartość opałową, zawartość popiołu, zawartość zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych. Paliwa te powinny mieć średnią wartość opałową nie mniejszą niż 13 MJ/kg, zawartość wilgoci do 30%, zawartość Cl (<1%), S (<2,5%), metali ciężkich (<2500 ppm), PCB + PCT (<50 ppm), Hg (<10 ppm) oraz zawartość Cd + Tl + Hg do 100 ppm.

W piecach z cyklonowymi wymiennikami ciepła (metoda sucha) paliwo alternatywne podawane jest głównie do strefy spalania paliwa podstawowego, za pomocą palnika piecowego bądź palnika dodatkowego lub do spalania wtórnego

do komory wzniosu oraz prekalcyntora. Można spalać w nich paliwa w ilości zapewniającej nawet 60% całkowitego zapotrzebowania ciepła. Szczegółowe rozwiązania dotyczące stosowania konkretnych paliw alternatywnych oraz problemów technicznych i procesowych z tym związanych prezentuje wiele prac [2–8].

Paliwami alternatywnymi (zastępczymi) SFR (z ang. Solid Refused Fuels) mogą być odpady stałe, ciekłe, komunalne i przemysłowe, stosowane w zakładach przemysłowych i energetycznych jako zamiennik paliw konwencjonalnych. Według systemu opracowanego przez Europejski Komitet Koordynacji Norm (Comité Européen de Coordination des Normes – CEN) – stałe paliwa wtórne mogą być wytwarzane wyłącznie z odpadów innych niż niebezpieczne i stosowane tylko w instalacjach spełniających standardy emisyjne, które wynikają z Dyrektywy 2000/76/EC dotyczącej spalania odpadów.

Szansą na upowszechnienie wykorzystania SRF jest rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 12 września 2008 r. w sprawie sposobu monitorowania wielkości emisji substancji objętych wspólnotowym systemem handlu uprawnieniami do emisji (Dz.U. z 2008 r. nr 138, poz. 1142), które umożliwia zaliczanie części energii powstającej ze spalania zawartej w nich biomasy do energii odnawialnej z zerową emisją CO₂. Paliwa SRF mogą zawierać frakcje biodegradowalne pochodzenia biogenicznego. W ich skład wchodzi: palna frakcja biodegradowalna (biomasa), palna frakcja pochodzenia innego niż biogeniczne oraz wilgoć i popiół [9].

Istotnym z punktu widzenia wykorzystania biomasy w procesach energetycznych jest udział biomasy w paliwach alternatywnych. W przypadku paliw wytwarzanych na bazie odpadów komunalnych lub przemysłowych, udział emisji zerowej CO₂ jest uzależniony od udziału biomasy w tym paliwie.

W tabeli 1 przedstawiono analizy dwóch przykładowych paliw alternatywnych (PASi, PASr) stosowanych w przemyśle, które zostały wytworzone na bazie odpadów.

T a b e l a 1

Przykładowe analizy paliw stosowanych w przemyśle cementowym

Parametry	Jednostka	Paliwo 1 (PASr)		Paliwo 2 (PASi)	
		dla stanu roboczego	dla stanu suchego	dla stanu roboczego	dla stanu suchego
Ciepło spalania	kJ/kg	19 510	23 350	16 460	21 520
Wartość opałowa	kJ/kg	17 870	21 870	15 080	20 470
Fracja nie-biomasy w odniesieniu do SBS*	% wag.	–	31,9	–	14,8
Fracja biomasy w odniesieniu do SBS*	% wag.	41,3	49,4	53,9	70,5
Fracja węgla biogenego w odniesieniu do całkowitej zawartości węgla	% wag.	41,9	41,9	80,0	80,0

cd. tab. 1

Parametry	Jednostka	Paliwo 1 (PASr)		Paliwo 2 (PASi)	
		dla stanu roboczego	dla stanu suchego	dla stanu roboczego	dla stanu suchego
Całkowity wskaźnik emisji CO ₂	tco ₂ /TJ	84,3	82,4	98,5	94,9
Niebiogenny wskaźnik emisji CO ₂	tco ₂ /TJ	49,0	47,9	19,7	19,0
Biogenny wskaźnik emisji CO ₂	tco ₂ /TJ	35,3	34,5	78,8	75,9

*SBS – paliwo alternatywne (wtórne) z niem. Sekundärbrennstoff.

4. Współspalanie biomasy zawartej w paliwach alternatywnych w przemyśle cementowym

W celu zbadania korzyści ekologicznych wynikających z zastąpienia części paliw kopalnych biomasą przeprowadzono obliczenia symulacyjne pracy układu wypalania klinkieru. Do obliczeń zmodyfikowano, opracowany w Instytucie, program komputerowy PIEC [10], oparty na modelu matematycznym układu wypalania klinkieru, bazujący na równaniach bilansu energii cieplnej i masy. Analizie poddano przykładową instalację pracującą w oparciu o metodę suchą z cyklonowymi wymiennikami ciepła o wydajności 5960 t/dobę i tzw. bypasssem na poziomie 3,8%. W modelu obliczeniowym założono, że:

- wielkościami zadanymi są: skład chemiczny oraz ilość surowca, skład chemiczny oraz wartość opałowa paliwa, jednostkowe zużycie ciepła, udział paliw alternatywnych w odpowiednich stosunkach, wynikających z założonego udziału w ciepłe ze spalania paliw w kalcynatorach i/lub palniku głównym, ilość gazów odsysanych przez bypass, współczynnik nadmiaru powietrza;
- wielkościami wyznaczanymi są: skład chemiczny i strumienie gazów odlotowych (w tym emisja CO₂), ilość wyprodukowanego klinkieru, strumienie paliw w kalcynatorach i w palniku głównym.

4.1. Opis układu

W analizowanej linii klinkier cementowy produkowany jest według suchej metody. Podstawowym agregatem linii produkcyjnej jest piec obrotowy wyposażony w rusztowy chłodnik klinkieru, 4-stopniowy, 2-gałęziowy wymiennik cyklonowy do podgrzewania i dekarbonizacji surowca, dwa kalcynatory z doprowadzeniem gorącego powietrza z głowicy pieca oraz układu odciągu gorących gazów z pieca (tzw. bypass). Ogólny schemat analizowanej instalacji o wydajności ok. 248,8 t/h wraz z charakterystycznymi parametrami w poszczególnych punktach układu, przy założeniu stosowania jako paliwa pyłu węglowego, przedstawiono na rycinie 1.

4.2. Wyniki obliczeń współspalania paliw kopalnych i biomasy zawartej w paliwach alternatywnych

Obliczenia symulacyjne wykonano przy wydajności początkowej wynoszącej ok. 248,8 t/h. Jest to wydajność rzeczywistej, przemysłowej linii wypalania klinkieru przy spalaniu tylko i wyłącznie pyłu węglowego. Jest to instalacja odniesienia, a do jej parametrów pracy będą porównywane wyniki obliczeń symulacyjnych (tzw. bilans porównawczy).

W niniejszym artykule podjęto się określenia wpływu współspalania z węglem paliwa PASr i PASi na emisję CO₂ oraz na wartości parametrów technologicznych pracującej instalacji. Do palnika głównego dodawano paliwo PASr ($Q_{\text{PASr}} = 17\,870 \text{ kJ/kg}_{\text{pal}}$, 41,3% biomasy), a do kalcynatorów paliwo PASi ($Q_{\text{PASi}} = 15\,080 \text{ kJ/kg}_{\text{pal}}$, 53,9% biomasy).

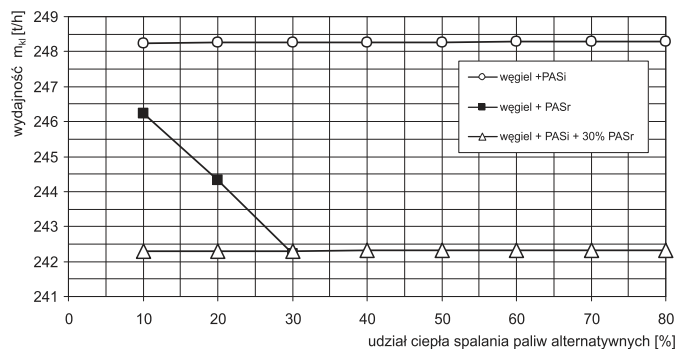
Przyjęto następujące warianty obliczeń:

– wariant 1 (węgiel + PASi): węgiel jest spalany w palniku głównym ($17,1 \text{ t}_{\text{węgiel}}/\text{h}$) i w komorze wzniosu ($2,0 \text{ t}_{\text{węgiel}}/\text{h}$) bez zmian wielkości jego strumienia, w kalcynatorach spalany jest węgiel (od 2 do 10 t/h) przy równoczesnym spalaniu paliwa PASi (od 1,8 do 14,6 $\text{t}_{\text{PASi}}/\text{h}$), a ilość ciepła w kalcynatorach uzyskana ze spalania paliwa PASi zmienia się odpowiednio od 10 do 80% (co 10%) ilości całkowitego ciepła ze spalania paliw w kalcynatorach;

– wariant 2 (węgiel + PASr): spalana jest stała ilość węgla w kalcynatorach ($10,0 \text{ t}_{\text{węgiel}}/\text{h}$) i w komorze wzniosu ($2,0 \text{ t}_{\text{węgiel}}/\text{h}$), a w palniku podawany jest strumień węgla (od 15,39 do 11,78 $\text{t}_{\text{węgiel}}/\text{h}$), przy podaży paliwa PASr (od 2,64 do 7,80 $\text{t}_{\text{PASr}}/\text{h}$), co odpowiada ilości ciepła uzyskanego z tego paliwa w palniku 10, 20 i 30%;

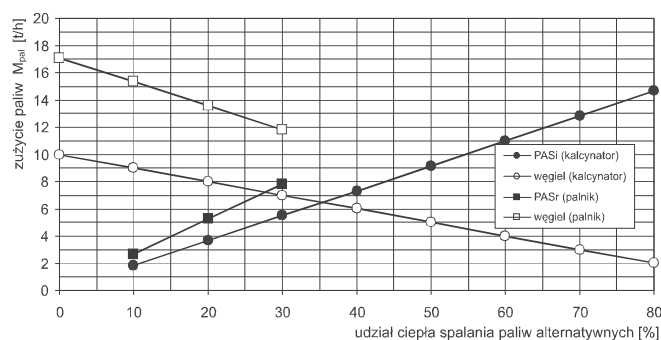
– wariant 3 (węgiel + PASi + 30% PASr): ilość ciepła w palniku uzyskana ze spalania paliwa PASr jest stała i wynosi 30% ($7,80 \text{ t}_{\text{PASr}}/\text{h}$ i $11,78 \text{ t}_{\text{węgiel}}/\text{h}$), w komorze wzniosu strumień węgla jest stały ($2,0 \text{ t}_{\text{węgiel}}/\text{h}$), a w kalcynatorach strumienie paliw zmieniają się od 10 do 80% ciepła uzyskanego z paliwa PASi.

Na rycinie 2 zobrazowano wpływ spalania paliw alternatywnych na wydajność pieca. Podczas spalania samego węgla wydajność wynosiła 248,255 t/h. Paliwo PASi spalane w kalcynatorach właściwie nie wpływa na zmianę wydajności. Z kolei wyniki obliczeń dla spalanego paliwa PASr dla 10, 20 i 30% zapotrzebowania ciepła w palniku głównym wskazują na znaczący spadek wydajności pieca. Jest to wynik podawania paliwa o niższej wartości opałowej, co powoduje zmniejszenie wysokości temperatury płomienia na palniku oraz wzrost ilości powietrza potrzebnego do spalania tego paliwa.



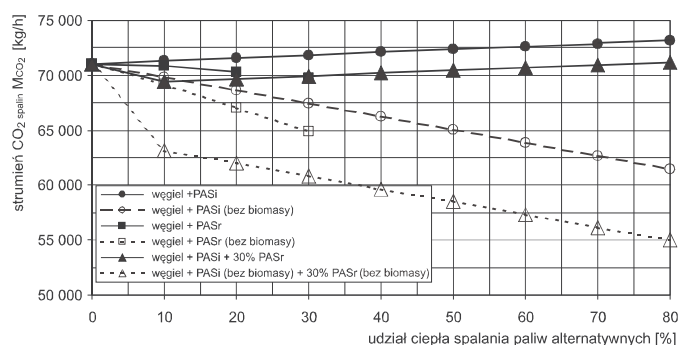
Ryc. 2. Zmiana wydajności pieca w zależności od udziału ciepła spalania paliw alternatywnych

Wydajność pieca jest najniższa dla wariantu 3 oraz dla wariantu 2 przy udziale paliwa PASr w ilości 30% zapotrzebowania ciepła w palniku.



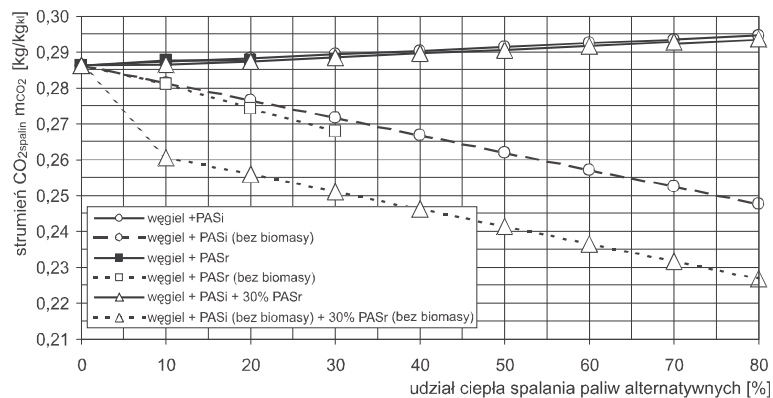
Ryc. 3. Zużycie paliw w zależności od udziału ciepła ze spalania paliw alternatywnych

Na rycinie 3 przedstawiono zużycie poszczególnych paliw. Wartości 0% odpowiadają warunkom bilansu odniesienia (spalanie tylko węgla w poszczególnych punktach instalacji).



Ryc. 4. Strumień CO₂ ze spalania paliw i biomasy

Na rycinie 4 przedstawiono zmiany wielkości strumienia masowego CO₂ ze spalania paliw i biomasy, a na rycinie 5 zmiany jednostkowego strumienia CO₂ w przeliczeniu na 1 kg klinkieru. Współspalanie paliwa PASr powoduje nieznaczne zmniejszenie rzeczywistego strumienia CO₂ wraz ze wzrostem udziału tego paliwa od 10 do 30% ilości ciepła spalania na palniku. W dwóch pozostałych przypadkach, wraz ze wzrostem udziału ciepła spalania paliwa PASi obserwuje się wzrost strumienia rzeczywistego i jednostkowego CO₂ ze spalania. Jednak w przypadku wariantu 3 (współspalanie paliwa PASr i PASi), obecność PASr w ilości odpowiadającej 30% ciepła w palniku, powoduje obniżenie emisji CO₂ w porównaniu do wariantu 1. Najkorzystniejszym paliwem z punktu widzenia ilości CO₂, powstającego ze spalania biomasy, jest paliwo PASr, a współspalanie go z paliwem PASi daje najlepszy efekt zmniejszenia rzeczywistej emisji CO₂.



Ryc. 5. Jednostkowy strumień CO₂ ze spalania paliw i biomasy

Przyjmuje się, że ilość emitowanego CO₂ ze spalania biomasy wynosi 0. Podczas spalania biomasy powstaje CO₂, lecz jego emisja nie przekracza ilości, którą pobrały rośliny podczas wzrostu. Dlatego też emisja CO₂ będzie mniejsza od uprzednio opisanej (ryc. 4, 5 – linie przerywane).

Ten korzystny efekt współspalania biomasy jest szczególnie widoczny dla tzw. emisji unikniętej, rycina 6. Jako emisję unikniętą należy rozumieć następującą zależność:

$$M_{\text{CO}_2\text{-unik}} = M_{\text{CO}_2\text{-spalania odn}} - (M_{\text{CO}_2\text{-węgiel+alter}} - M_{\text{CO}_2\text{-z biomasy}})$$

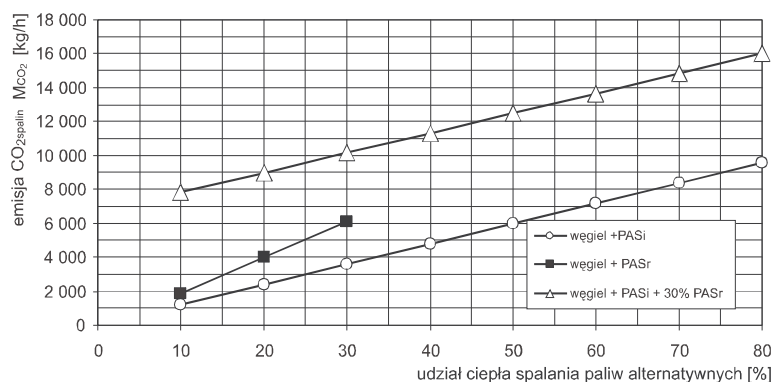
gdzie:

$M_{\text{CO}_2\text{-unik}}$ – emisja uniknięta,

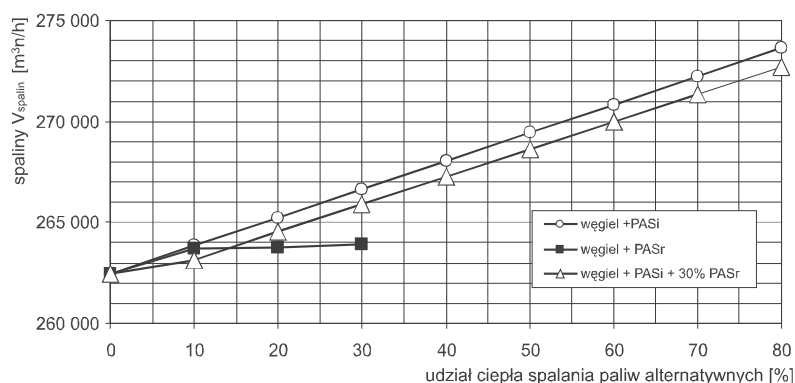
$M_{\text{CO}_2\text{-spalania odn}}$ – ilość CO₂ ze spalania tylko węgla (bilans odniesienia),

$M_{\text{CO}_2\text{-węgiel+alter}}$ – ilość CO₂ ze współspalania węgla i paliw alternatywnych,

$M_{\text{CO}_2\text{-z biomasy}}$ – ilość CO₂ ze spalania z biomasy zawartej w paliwach alternatywnych.

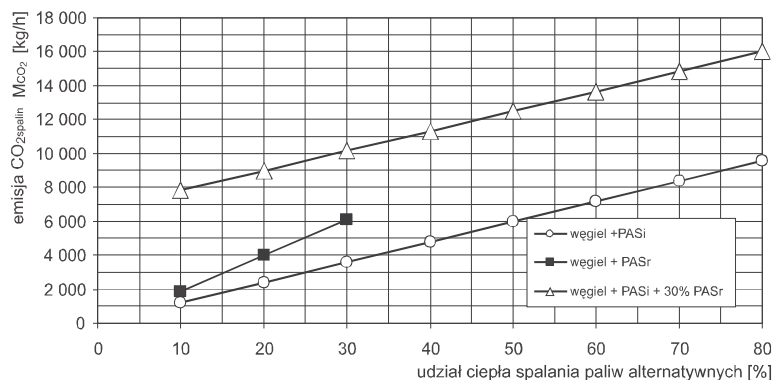
Ryc. 6. Emisja uniknięta CO₂

Korzyścią współspalania biomasy w procesie wypału klinkieru jest zmniejszenie emisji jednego z gazów cieplarnianych. Wielkość emisji unikniętej wzrasta wraz z ilością współspalanej biomasy. Najkorzystniejsze z punktu widzenia ochrony klimatu jest współspalanie paliw alternatywnych zawierających biomasę w kalcyntorze i paliwie głównym.



Ryc. 7. Strumień spalin w gazach odlotowych

Na wartość strumienia emisji unikniętej wpływ ma skład chemiczny i wartość kaloryczna paliwa alternatywnego, oraz miejsce jego podawania w instalacji, które z kolei oddziałują na wielkość emisji spalin (ryc. 7, 8). Obecność paliwa PASi przyczynia się do wzrostu strumienia spalin i gazów odlotowych.



Ryc. 8. Jednostkowy strumień spalin w gazach odlotowych

5. Wnioski

1. Obecność paliwa PASr obniża wydajność pieca o ok. 6 t/h, natomiast współspalanie paliwa PASi z węglem nie ma większego wpływu na wydajność.
2. Spalanie paliwa PASi powoduje niewielki przyrost strumienia rzeczywistego i jednostkowego CO₂ ze spalania oraz przyrost wielkości strumienia spalin o ok. 4%. Strumień rzeczywisty gazów spalinowych i odlotowych podczas spalania paliwa PASr jest w zasadzie stały, a w przeliczeniu na 1 kg_{kl} zwiększa się.
3. Najwięcej korzyści ze względu na emisję unikniętą przynosi spalanie paliwa PASr.
4. Obliczenia tzw. emisji unikniętej dają pełny obraz sensu stosowania danego paliwa ze względu na emisję tzw. zielonego CO₂ i uniknięcia opłat związanych z tą emisją.
5. Istotne znaczenie na wydajność pieca, emisję CO₂, a przede wszystkim na emisję unikniętą CO₂ ma skład chemiczny, wartość opałowa i miejsce dozowania paliwa.

6. Podsumowanie

Aby ograniczyć zanieczyszczenie atmosfery i częściowo rozwiązać problemy energetyczne, należy produkcję ciepła oprzeć w większym stopniu, niż jest to obecnie, na przyjaznych dla środowiska naturalnego i praktycznie niewyczerpalnych odnawialnych źródłach energii. Zwiększenie udziału energii odnawialnej w strukturze paliwowej powoduje również znaczne obniżenie emisji gazów cieplarnianych (emisja gazów cieplarnianych z OZE jest niska lub zerowa).

Przemysł cementowy cechuje wysoka energochłonność, w celu zmniejszenia wykorzystania paliw kopalnych stosuje się paliwa alternatywne.

Przeprowadzona analiza przykładowych paliw z grupy PASr i PASi wykazała, że frakcja biomasy w tych paliwach jest wysoka i wynosi ponad 40%. Oblicze-

nia symulacyjne pracy pieca obrotowego wskazują, że z powodu utrzymania wydajności pieca korzystniejszym jest paliwo PASi. Obecność paliwa PASr w ilości 30% zapotrzebowania ciepła w palniku głównym zdecydowanie korzystnie działa na wartość emisji unikniętej CO₂, co jest niewątpliwą zaletą tego paliwa. Wpływa ono jednak negatywnie na wydajność pieca (spadek o ok. 6 t/h).

Literatura

- [1] Lewandowski W., *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, WNT, Warszawa 2006.
- [2] Duda J., *Współspalanie węgla i paliw alternatywnych w cementowych piecach obrotowych*, „Prace IMMB” 2003, nr 35/36.
- [3] Czaplak A., *Doświadczenia Lafarge Cement Polska S.A. Cementownia Małogoszcz ze współspalaniem paliw alternatywnych*, [w:] VII Międzynarodowe Seminarium „Odzysk energetyczny – rola przemysłu cementowego w gospodarce odpadami”, 30.05.2006 Kraków, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2006.
- [4] Walaszek J., *Paliwa alternatywne a współistnienie przemysłu cementowego ze środowiskiem*, [w:] VII Międzynarodowe Seminarium „Odzysk energetyczny – rola przemysłu cementowego w gospodarce odpadami”, 30.05.2006, Kraków, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2006.
- [5] *Paliwa alternatywne w Cementowni Chełm S.A.*, [w:] VII Międzynarodowe Seminarium „Odzysk energetyczny – rola przemysłu cementowego w gospodarce odpadami”, 30.05.2006, Kraków, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2006.
- [6] Tarach M., *Odzysk energetyczny odpadów w Cementowni Nowiny*, [w:] VII Międzynarodowe Seminarium „Odzysk energetyczny – rola przemysłu cementowego w gospodarce odpadami”, 30.05.2006, Kraków, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2006.
- [7] Wąsik A., *Paliwa alternatywne w Cementowni Nowiny*, [w:] VII Międzynarodowe Seminarium „Odzysk energetyczny – rola przemysłu cementowego w gospodarce odpadami”, 30.05.2006, Kraków, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2006.
- [8] Hafner H.W., Kudorfer G.A., *Dozowanie paliw wtórnych w procesie wypalania klinieru*, „Cement, Wapno, Beton” 2002, nr 3.
- [9] Nadziakiewicz J., Wacławiak K., Stelmach S., *Procesy termiczne utylizacji odpadów*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.
- [10] Kalinowski W., Sładeczek F., Trembacz J., Paprotny W., Adamczyk Z., *Opracowanie modelu obliczeń bilansu materiałowo-ciepłnego procesów technologicznych ze szczególnym uwzględnieniem spalania paliw alternatywnych i odpadów przemysłowych*, Prace statutowe IMMB, symbol pracy 4/612/S, Opole 2004.

JAROSŁAW TREMBACZ
FRANCISZEK SŁADECZEK

BIOMASS AS A SOURCE OF HEAT IN CEMENT KILNS

In the paper properties of selected alternative fuels and biomass used as source of heat in co-incineration with hard coal in cement kilns were described. Simulate estimations of heat and mass balance during co-incineration of fuels PASr and PASi were executed, influence of combustion of biomass fractions on CO₂ emission and other technological kiln's parameters were discussed.