

*EWA GŁODEK\**

*JAROSŁAW TREMBACZ\*\**

## **Efekty wykorzystania gazu uzyskanego ze zgazowania biomasy i odpadów do wypalania klinkieru**

W powszechnie stosowanej technologii wypalania klinkieru, tj. w piecach z cyklonowymi wymiennikami ciepła, 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. Wykorzystanie paliwa innego niż konwencjonalne wiąże się z występowaniem niekorzystnych zjawisk i utrudnień w prowadzeniu procesu, mających charakter zarówno techniczny, jak i technologiczny. Jednym ze sposobów eliminacji tego zjawiska jest stosowanie jednorodnej mieszaniny w postaci gazowej – uzyskanej w wyniku zgazowania paliw. W celu oceny korzyści ekologicznych wynikających z zastąpienia części paliw kopalnych gazem powstałym w wyniku termicznego rozkładu odpadów / biomasy tzw. syngazem przeprowadzono obliczenia symulacyjne pracy układu wypalania klinkieru. Analizie poddano przykładową instalację pracującą w oparciu o metodę suchą z cyklonowymi wymiennikami ciepła.

### **1. Wprowadzenie**

W celu zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego oraz przeciwstawienia się zmianom klimatycznym Unia Europejska prowadzi politykę nakierowaną na zmniejszenie zapotrzebowania na energię przez m.in. poprawę efektywności energetycznej, redukcję gazów cieplarnianych, zwiększenie stosowania energii ze źródeł odnawialnych, dywersyfikację źródeł energii. Jednym z podstawowych dokumentów jest dyrektywa unijna nr 2009/28/WE w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych. Zakładała ona, że udział energii odnawialnej w całkowitym zużyciu energii (energia elektryczna, ogrzewanie,

---

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

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

chłodzenie, transport) w Polsce do 2020 r. powinien kształtować się na poziomie 15%. Drugim istotnym dokumentem jest dyrektywa Rady 1999/31/WE w sprawie składowania odpadów. Zgodnie z obowiązującym prawem w 2020 r. ilości odpadów biodegradowalnych, które można będzie deponować na składowiskach będzie zmniejszona o 65% w stosunku do roku bazowego 1995. Aby sprostać przepisom, należy więc zwiększyć wykorzystanie OZE, w tym biomasy, jak również zwiększyć ilość wykorzystywanych energetycznie odpadów, np. poprzez wykorzystanie technologii zgazowania.

Technologia zgazowania stosowana jest od ponad wieku. Pierwszy patent na produkcję urządzenia do zgazowania otrzymała niemiecka firma LURGI w 1887 r. W przypadku zgazowania węgla na świecie pracuje kilkaset układów, wykonywanych głównie w technologiach Stell, Texaco, Lurgi. Fizykochemiczne właściwości biomasy / paliw alternatywnych powodują, że zgazowanie jej w tego typu reaktorach jest trudne. Obecnie technologie zgazowania biomasy / odpadów rozwijają się niezależnie w stosunku do technologii zgazowania węgla. Znanych jest wiele technologii zgazowania biomasy, które jednak nie są jeszcze szeroko stosowane komercyjnie. W krajowym przemyśle cementowym zgazowanie odpadów w osobnym reaktorze nie jest stosowane. W Europie istnieje tylko jedna instalacja zintegrowanych z reaktorem zgazowania paliw alternatywnych.

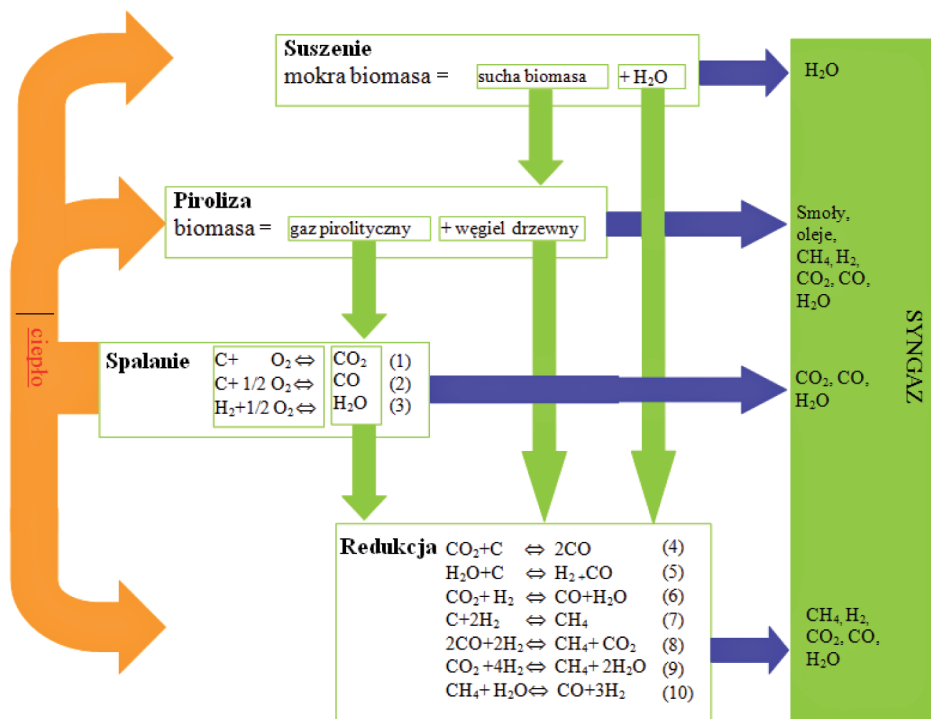
W powszechnie stosowanej technologii wypalania klinkieru, tj. w piecach z cyklowymi wymiennikami ciepła, paliwo alternatywne podawane jest głównie do strefy spalania paliwa podstawowego za pomocą palnika piecowego bądź palnika dodatkowego lub do spalania wtórnego – do komory wzniosu oraz prekalcyntora. Współspalanie paliw alternatywnych w układzie pieca obrotowego jest przyczyną występowania różnych niekorzystnych zjawisk mających zarówno charakter technologiczny, jak i techniczny. Jednym z utrudnień jest np. przesunięcie stref temperatur w układzie wymiennika, spowodowanych wydłużeniem długości płomienia na palniku głównym. Zmniejszenie występowania niekorzystnych zjawisk występujących podczas współspalania paliw alternatywnych jest możliwe m.in. poprzez zastosowanie jednorodnej mieszaniny w postaci gazowej – uzyskanej w wyniku zgazowania paliw.

## 2. Charakterystyka procesu zgazowania

W najszerszym znaczeniu zgazowanie oznacza zamianę substancji zawierającej pierwiastek węgla w gaz. W nowoczesnych metodach zgazowania otrzymuje się właściwie dwa produkty: mieszaninę gazów ( $H_2$ , CO,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ), nazywaną gazem syntezowym lub syngazem, i pozostałość mineralną w postaci popiołu. W zależności od realizacji procesu tworzą się również produkty uboczne, jak kondensujące się lotne i ciekłe substancje smoliste.

Proces zgazowania biomasy wirtualnie dzieli się na kilka stref [3] (ryc. 1): suszenie, pirolizę, spalanie, redukcję, czasami reforming części lotnych oraz zga-

zowanie stałej pozostałości węglowej (karbonizatu). Pierwszym etapem procesu zgazowania jest suszenie substancji, która może zawierać do 50% wilgotności. W temperaturze 100–200°C dochodzi do jej odparowania. Kolejnym etapem jest piroliza. W tej fazie następuje uwolnienie z biomasy gazowych części lotnych w podwyższonej temperaturze w atmosferze beztlenowej. Temperatura procesu pirolizy zawiera się w dość szerokich granicach, tzn. od 200 do 600°C. Produktami pirolizy są: frakcje stałe (węgiel drzewny, półkoks, koks oraz balast mineralny); produkty ciekłe (smoły, oleje, woda pogazowa); gaz palny: CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, węglowodory aromatyczne (benzen, toluen, ksylen itp.). Ostatnim etapem jest proces zgazowania fazy pozostałej po pirolizie (uwęglonej i odgazowanej fazy stałej oraz ciekłej). Polega on na realizacji całego szeregu egzotermicznych i endotermicznych reakcji chemicznych (przy niedoborze tlenu), połączonych z procesami wymiany masy i ciepła, w wyniku których powstają gazowe składniki palne: CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> (tworzą się również substancje ciekłe i smoliste oraz stałe: koksik, żużel). Temperatura procesu zgazowania zazwyczaj jest wyższa niż 750°C.



Ryc. 1. Etapy procesu zgazowania [7]

Na przebieg procesu zgazowania, w tym na ilości i jakość otrzymywanych produktów, ma wpływ wiele czynników, takich jak: rozmiar, kształt, struktura cząst-

ki, szybkość ogrzewania, temperatura, ciśnienie, skład popiołu, rodzaj czynnika zgazującego itp. [5]. Powszechnie stosowanym i tanim medium jest powietrze. Niestety, zawiera dużą ilość balastu w postaci azotu, który wpływa na obniżenie wartości opałowej produkowanego syngazu. Wyższe wartości opałowe gazu syntezowego, rzędu 17 MJ/m<sup>3</sup> można osiągnąć stosując specjalne technologie zgazowania, np. parą wodną, tlenem itp. Innym sposobem zwiększenia wydajności procesu jest zmiana parametrów reakcji, tj.: zwiększenie temperatury procesu oraz ciśnienia. Wzrost temperatury wpływa na zwiększenie udziału składników palnych (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>). Natomiast wzrost ciśnienia zgazowania może podnieść wydajność reakcji powstawania metanu, przez co zwiększa się wartość opałowa gazu. Wydajność procesu (konwersja węgla zawartego w biomase) zależy od powierzchni kontaktu gazu z frakcją stałą w strefie redukcji oraz czasu przebywania gazu w strefie redukcji. Zwiększenie powierzchni strefy redukcji można osiągnąć stosując technologie zgazowania fluidalnego. Wszystkie wymienione zabiegi pozwalają ostatecznie zwiększyć wartość opałową gazu syntezowego oraz zwiększyć wydajność procesu. Wiąże się to z podwyższeniem nakładów inwestycyjnych oraz zwiększeniem zużycia energii na potrzeby własne (produkcja czystego tlenu, technika fluidalna, podwyższenie ciśnienia procesu).

### 3. Obliczenia symulacyjne pracy układu wypalania

#### 3.1. Opis instalacji wypalania klinkieru

W celu zbadania korzyści ekologicznych wynikających z zastąpienia części paliw kopalnych syngazem przeprowadzono obliczenia symulacyjne pracy układu wypalania klinkieru. Do obliczeń zmodyfikowano, opracowany w Instytucie, program komputerowy PIEC, oparty na modelu matematycznym układu wypalania klinkieru, bazujący na równaniach bilansu energii i substancji. Analizie poddano przykładową instalację pracującą w oparciu o metodę suchą z cyklonowymi wymiennikami ciepła i tzw. by-passsem.

Na rycinie 2 przedstawiono schemat instalacji wypalania klinkieru wraz z parametrami technologicznymi przy spalaniu węgla. Układ ten traktowany jest jako układ odniesienia, do którego porównywane będą wyniki symulacji współspalania węgla i syngazu wytworzonego z opon, topoli i paliwa RDF. Wybrane parametry spalanego węgla przedstawiono w tabeli 1, a wytworzonego syngazu w tabeli 2.

Tabela 1

Charakterystyka pyłu węglowego [7]

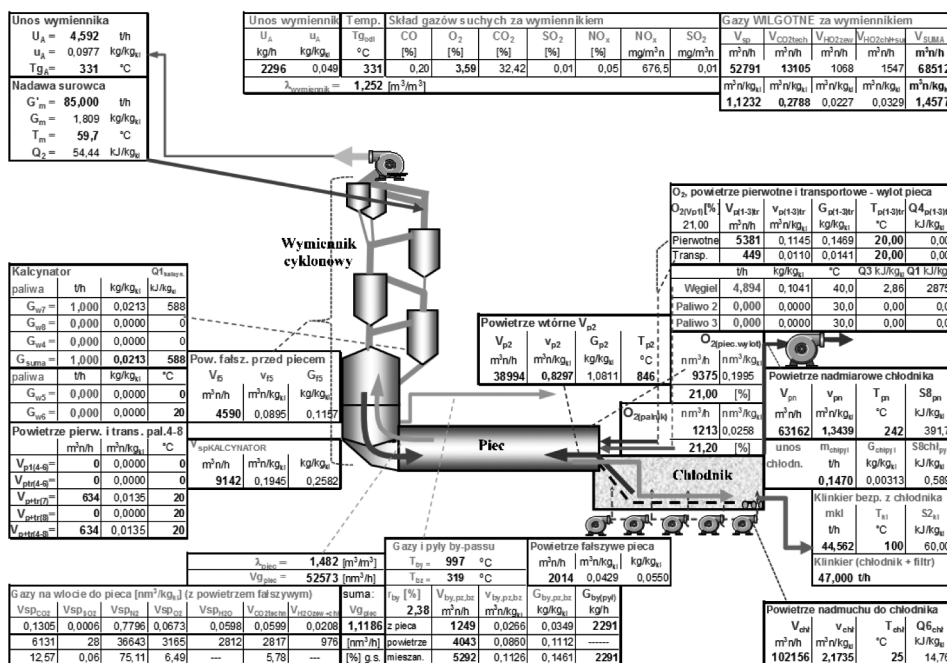
Zawartość części lotnych w paliwie	[%]	Czlot	31,53
Wilgotność paliwa	[%]	Wr	2,8
Wartość opałowa paliwa	[kJ/kg]	Qwr	27 615

Tabela 2

Charakterystyka syngazu [6]

	Gas z RDF	Gas z opon	Gas z topoli
Udział biomasy w paliwie [%]	35	27	100
Składnik paliwa gazowego	udział obj.	udział obj.	udział obj.
CO	0,1600	0,0700	0,2500
H <sub>2</sub>	0,4400	0,5500	0,5000
metan CH <sub>4</sub>	0,1800	0,2900	0,1000
etan C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,0600	0,0500	0,0200
CO <sub>2</sub>	0,1800	0,0500	0,2300
O <sub>2</sub>	0,0000	0,0200	0,0000
Q <sub>r</sub> <sup>w</sup> [kJ/(m <sup>3</sup> n)]	17 944	21 176	14 347
[kJ/kg]	22 380	39 397	15 815

Podstawowym agregatem linii produkcyjnej jest piec obrotowy, wyposażony w rusztowy chłodnik klinkieru, 4-stopniowy wymiennik cyklonowy do podgrzewania i dekarbonizacji surowca, kalcynator z doprowadzeniem dodatkowego strumienia spalanego pyłu węglowego oraz instalacji by-passu (ryc. 2).



Ryc. 2. Schemat instalacji wypalania klinkieru wraz z parametrami technologicznymi (spalanie tylko pyłu węglowego) [7]

Nadawa mączki podawana jest do górnej części wymiennika cyklonowego. Podczas przepływu przeciwprądowego mączki, w stosunku do gorących gazów piecowych, następuje podgrzanie surowca, odparowanie wilgoci i wstępna dekarbonizacja (wydzielenie się  $\text{CO}_2$  technologicznego). W dolnej części wymiennika cyklonowego znajduje się kalcynator, w którym spalany jest pył węglowy. Ciepło spalin z kalcynatora zużywane jest do podgrzania gazów piecowych i mączki. Podgrzany i wstępnie zdekarbonizowany surowiec dostaje się do pieca obrotowego, w którym następuje dalsze podgrzanie surowca i następny etap dekarbonizacji. Ciepło w piecu wytwarzane jest w palniku głównym, w którym współspalany jest pył węglowy i syngaz. Wytworzony w piecu klinkier dostaje się do chłodnika rusztowego, gdzie następuje jego schłodzenie za pomocą strumienia powietrza podawanego pod ruszt. Schłodzony klinkier poprzez łamacz chłodnika transportowany jest następnie do hali klinkieru, a ogrzane powietrze podzielone jest na dwa strumienie: powietrze wtórne podawane na piec i powietrze nadmiarowe.

### 3.2. Wyniki obliczeń symulacyjnych

Głównym celem obliczeń symulacyjnych jest sprawdzenie możliwości współspalania trzech rodzajów syngazu z pyłem węglowym i jego wpływu na parametry procesowe oraz tzw. emisję unikniętą  $\text{CO}_2$ .

Obliczenia symulacyjne wykonano przy wydajności rzeczywistej przemysłowej linii wypalania klinkieru przy spalaniu tylko i wyłącznie pyłu węglowego. Instalacja ta wraz z odpowiadającymi jej parametrami traktowana jest jako instalacja odniesienia, do której będą porównywane wyniki obliczeń symulacyjnych (tzw. bilans porównawczy).

W obliczeniach symulacyjnych przyjęto zmienny strumień mieszaniny pyłu węglowego i syngazu podawanego do palnika głównego. Założono jednak, że spalanie mieszanin tych paliw dostarcza odpowiednią ilość ciepła, zgodnie z poniższą zależnością:

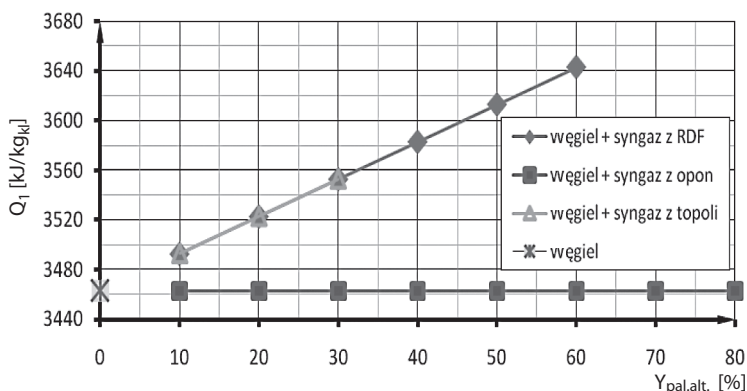
$$Q_1 = 3462,86 + (0,003 \cdot Y_{\text{pal.alt}}) \cdot 1000 \quad [\text{kJ/kg}_{\text{kl}}] \quad (1)$$

gdzie:

$Y_{\text{pal.alt}}$  [%] – udział ciepła uzyskanego ze spalania syngazu w całkowitym zużyciu ciepła.

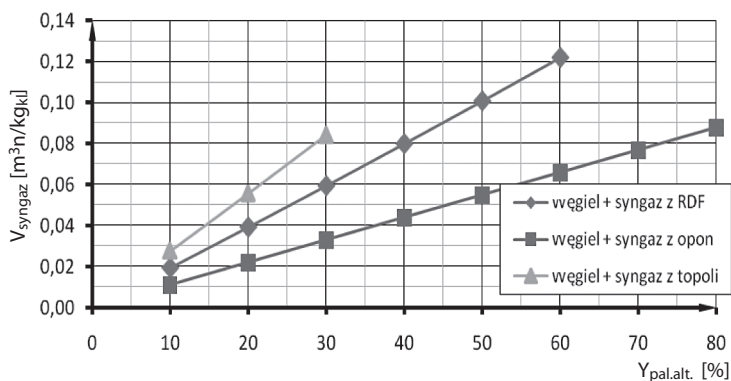
Jednostkowe zużycie ciepła rośnie wraz ze wzrostem udziału ciepła ze spalania syngazu wytwarzanego z paliwa RDF i topoli, gdyż wartość opałowa tych paliw jest niższa niż pyłu węglowego (w przeliczeniu na 1 kg paliwa). W przypadku współspalania syngazu otrzymanego z opon założono, że jednostkowe zużycie ciepła będzie analogiczne do spalania pyłu, ze względu na wysoką wartość opałową tego syngazu.

Na kolejnych rycinach (3–7) przedstawiono wybrane parametry w zależności od udziału ciepła ze spalania syngazu w całkowitym jednostkowym zużyciu ciepła.



Ryc. 3. Całkowite zużycie ciepła jednostkowego przy współspalaniu pyłu węglowego i syngazu [7]

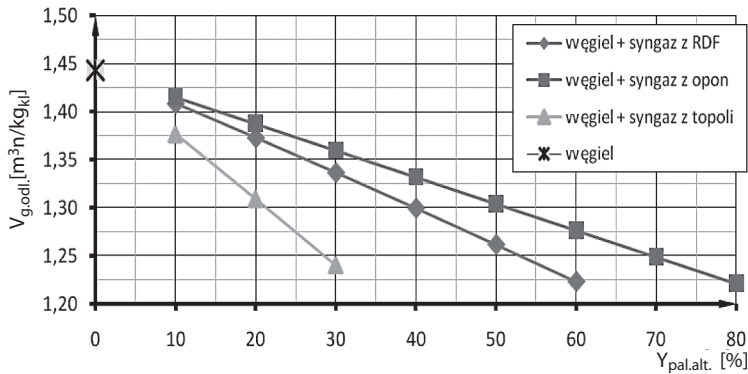
Jednostkowe zużycie ciepła  $Q_1$  przy współspalaniu pyłu węglowego i syngazu z paliwa RDF i topoli założono zgodnie z równaniem (1), a dla syngazu z opon przyjęto analogicznie jak dla pyłu węglowego (ryc. 3). Przy takich założeniach zużycie ciepła z syngazu z topoli na poziomie 30% wynika z niskiej jego wartości opałowej. Przy tym udziale syngazu zastępcza wartość opałowa paliw na palniku głównym osiągnęła dopuszczalną wartość 22 MJ/kg<sub>pal.</sub>. Przy takich założeniach jednostkowe zużycie syngazu jest zgodne z wartościami przedstawionymi na rycinie 4.



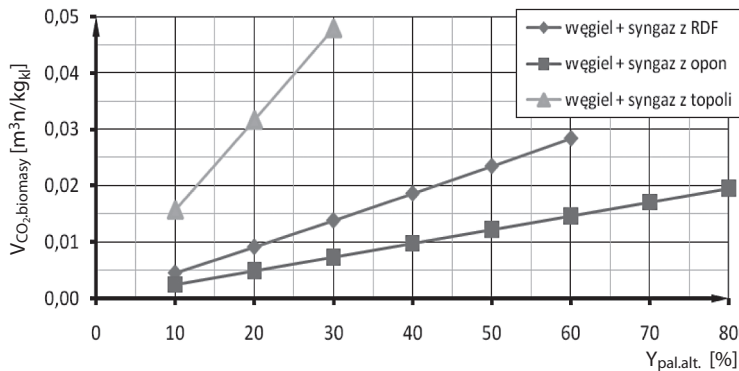
Ryc. 4. Jednostkowe zużycie syngazu [7]

Jednostkowy strumień gazów odlotowych przedstawiono na kolejnej rycinie 5, a jednostkowy strumień objętości i masy  $CO_2$  z biomasy na rycinach 6 i 7. Jednostkowo najwyższa wartość  $CO_2$  z biomasy zaobserwowana jest dla syn-

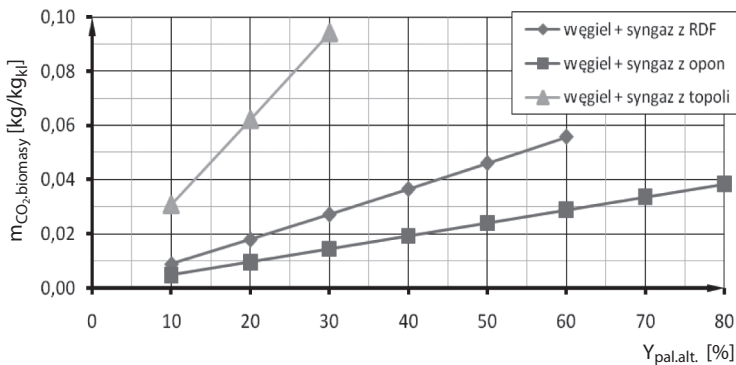
gazu z topoli. Jest to wynik przeliczeń dla udziału biomasy w tym syngazie na poziomie 100%. Pozytywnym efektem współspalania syngazu jest zmniejszenie strumienia gazów odlotowych (ryc. 5), co przekłada się na zmniejszenie zużycia energii elektrycznej przez wentylatory odlotowe.



Ryc. 5. Jednostkowy strumień gazów odlotowych [7]



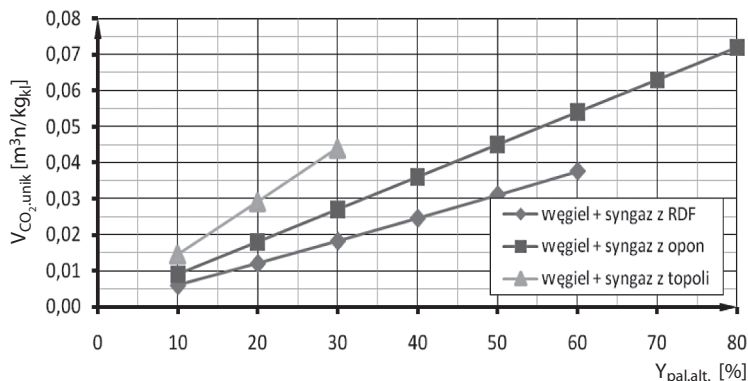
Ryc. 6. Jednostkowy strumień objętości CO<sub>2</sub> z biomasy [7]



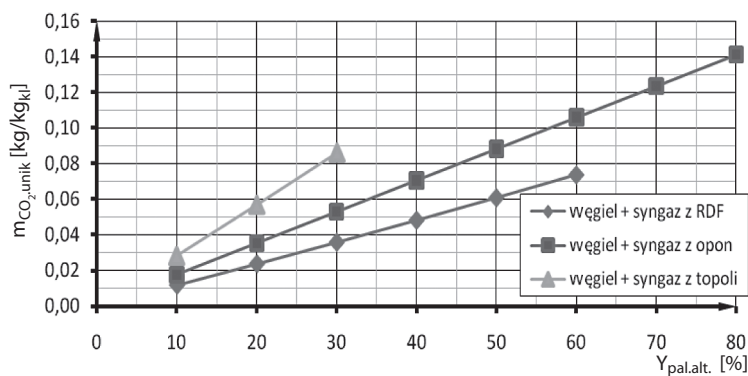
Ryc. 7. Jednostkowy strumień masy CO<sub>2</sub> z biomasy [7]



Jednostkowy strumień objętości i masy emisji unikniętej CO<sub>2</sub> przedstawiono na rycinach 8 i 9.



Ryc. 8. Jednostkowy strumień objętości emisji unikniętej [7]



Ryc. 9. Jednostkowy strumień masy emisji unikniętej [7]

Dzięki wysokiej wartości opalowej oraz zastosowaniu do 80% ciepła ze spalania syngazu z opon uzyskano największy strumień jednostkowy emisji CO<sub>2</sub> unikniętej.

## 4. Podsumowanie

Wzrost wykorzystania paliw alternatywnych uwarunkowany jest obowiązującymi przepisami prawnymi, bowiem polityka energetyczna państw członkowskich Unii Europejskiej nakierowana jest na energetyczne wykorzystanie odpadów i biomasy. Jednakże wykorzystanie paliwa innego niż konwencjonalne wiąże się z występowaniem niekorzystnych zjawisk i utrudnień w prowadzeniu procesu. Jednym ze sposobów eliminacji tego zjawiska jest uzyskanie jednorodnej mieszaniny w postaci gazowej – poprzez zgazowanie paliwa.

W celu zbadania korzyści ekologicznych wynikających z zastąpienia części paliw kopalnych syngazem przeprowadzono obliczenia symulacyjne pracy układu wypalania klinkieru. Obliczenia wykonano dla gazu uzyskanego w wyniku termicznego rozkładu trzech różnych paliw (opony, biomasa i RDF).

Wyniki obliczeń wykazują, że w celu uzyskania odpowiednich parametrów technologicznych (różnica temperatur pomiędzy płomieniem a materiałem) można współspalać na palniku głównym pył węglowy z syngazem. Ilość ciepła uzyskana ze współspalania pyłu węglowego z syngazem z biomasy, dla analizowanego układu, wynosi maksymalnie 30%, z syngazem z RDF 60%, a dla syngazu z opon ponad 80% w całkowitym cieple uzyskanym ze spalania paliw. Wielkość strumienia współspalanego syngazu zależy od jego wartości opałowej.

We wszystkich wariantach współspalania uzyskano obniżanie się wielkości strumienia gazów odlotowych wraz ze wzrostem udziału ciepła uzyskiwanego ze spalania syngazu. Wynikiem tego są również wymierne korzyści w oszczędnościach na kosztach energii elektrycznej wentylatora wyciągowego gazów odlotowych.

Kolejną, bardzo istotną korzyścią ze współspalania syngazu jest tzw. emisja uniknięta CO<sub>2</sub>. Jest to CO<sub>2</sub>, które wynika z udziału biomasy zawartej w zgazowanym odpadzie (biomasie). Dzięki wysokiej wartości opałowej oraz zastosowaniu do 80% ciepła ze spalania syngazu z opon uzyskano największy strumień jednostkowy emisji CO<sub>2</sub> unikniętej. Wielkość tej emisji ma istotny wpływ na ograniczenie opłat związanych z emisją CO<sub>2</sub> do atmosfery.

Reasumując, na palniku głównym analizowanego pieca obrotowego istnieje możliwość współspalania węgla i syngazu o wartości opałowej powyżej 16 MJ/m<sup>3</sup>.

## Literatura

- [1] Nadziakiewicz J., Wacławiak K., Stelmach S., *Procesy termiczne utylizacji odpadów*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.
- [2] Rybak W., *Spalanie i współspalanie biopaliw stałych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006.
- [3] Chmielniak T., Skorek J., Kalina J., Lepszy S., *Układy energetyczne zintegrowane ze zgazowaniem biomasy*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008.
- [4] Ptasinski K.J., Prins M.J., Pierik A., *Exergetic evaluation of biomass gasification*, „Energy” 2007, No. 32, s. 568–574.
- [5] *Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy*, red. M. Ściążko, H. Zieliński, Wydawnictwo IChPW i IGSMiE PAN, Zabrze–Kraków 2003.
- [6] Galvagno S., Casciaro G., Casu S., Martino M., Mingazzini C., Russo A., Portofino S., *Steam gasification of tyre waste, poplar, and refuse-derived fuel: A comparative analysis*, „Waste Management” 2009, No. 29, s. 678–689.
- [7] Głodek E., Trembacz J., Jaskóła R., *Układy energetycznego zgazowania biomasy / odpadów*, praca statutowa nr 4N008S10.

*EWA GŁODEK  
JAROSŁAW TREMBACZ*

#### THE POSSIBILITIES OF USING GASES FROM GASIFICATION OF BIOMASS AND WASTES FOR BURNING CLINKER

In universally the applied technology of burning the clinker, in stoves with cyclone heat exchangers alternative fuel is dosed mainly to zone of base fuels combustion with head or additional burner, or to secondary burning: to ascending chamber as well as pre-calciner. Utilization of fuel different than conventional, combines with occurrence of the unfavourable phenomena and the difficulties in operating of process, having the character both technical how and technological. The one of the method of eliminating of this phenomenon is applying of homogeneous mixture gas – received as a result of fuels gasification. It in aim of opinion of ecological advantages resulting from replacement of the portion of mineral fuels with gas formed in result of thermal decomposition of waste / biomass, so-called syngas, the calculating simulation works of burning the clinker was performed. The analysis of the example instalation working as a dry method with cyclone exchangers of heat installation was executed.