

INNOWACYJNY SPOSÓB WYKORZYSTANIA ZUŻYTYCH OPON SAMOCHODOWYCH W PROCESIE WYPALANIA KLINKIERU CEMENTOWEGO

Jacek TOMASIAK, Mariusz KOŁOSOWSKI, Przemysław MALINOWSKI

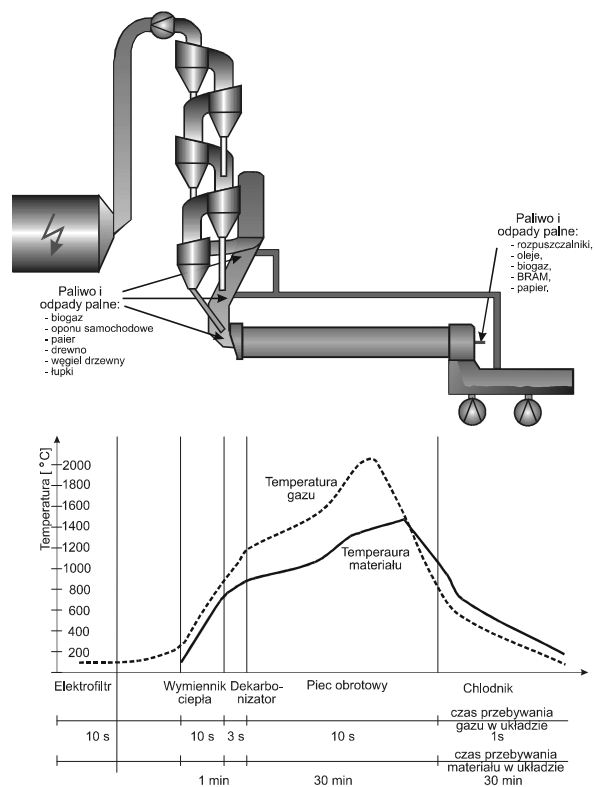
Streszczenie: Proces współspalania paliw alternatywnych z pyłem węglowym lub innymi paliwami nieodnawialnymi jest obecnie powszechnie stosowany w całym światowym przemyśle cementowym. Wynika to głównie z naturalnych warunków technologicznych, które wynikają z wysokotemperaturowego procesu wypalania klinkieru cementowego. W pracy przedstawiono możliwości termicznej utylizacji zużytych opon samochodowych w piecu obrotowym.

Słowa kluczowe: piec obrotowy, paliwa alternatywne, pyroliza

1. Wprowadzenie

Paliwa alternatywne z odpadów stanowią dzisiaj w wielu procesach wypalania klinkieru w piecu obrotowym w kraju podstawowe paliwo technologiczne. Jak wynika z danych statystycznych już w roku 2016 ponad 50% ciepła na wypalanie klinkieru pokrywały paliwa z odpadów. Przemysł cementowy w Polsce, który jeszcze pod koniec XX wieku należał do grupy państw o bardzo niskim ok. 2-3% wykorzystaniu tych paliw, należy obecnie z ponad 55% udziałem do ścisłej czołówki w Europie. Takie wielkie wykorzystanie paliw alternatywnych wynika nie tylko z dużej różnicy cen w stosunku do drogiego pyłu węglowego (koszt węgla + przemiał), ale duże znaczenie ma również efekt ekologiczny. Paliwa z odpadów charakteryzują się znacznie niższą emisją CO₂ w stosunku do spalania pyłu węglowego. Ponadto, ze względu na wyższą zawartość wilgoci w stosunku do pyłu węglowego oraz gorszego rozdrobnienia, proces spalania charakteryzuje się niższą temperaturą płomienia co sprzyja niższą emisją termicznych NO_x. Jak wynika z danych eksploatacyjnych pieców opalanych w procesie współspalania paliw z odpadów i węgla, proces ten charakteryzuje się niższą emisją szkodliwych dla środowiska gazów i pyłów. W stosunku do innych metod termicznej utylizacji odpadów łącznie z zawodowymi spalarniami, wysokotemperaturowy proces wypalania klinkieru ma szereg zalet i ze względu na warunki jakie zabezpiecza jest bezkonkurencyjny. Oprócz wysokiej temperatury wypalania (ok. 2000K) i czasu przebywania gazów w temperaturze > 1400K co jest wymagane ze względu na destrukcję ewentualnie powstałych w procesie spalania paliw dioksyn i furanów, zaletą pieca jest jego duża pojemność cieplna. Wysoka temperatura materiału w strefie spiekania (1700K) i jego masa oraz temperatura wymurówki pieca zabezpieczają warunki do spalania paliw jeszcze kilka godzin po zaniku płomienia, bez tzw. świeczki, co wymagane jest w innych urządzeniach spalających odpady. Piec obrotowy podobnie jak inne urządzenia do termicznej utylizacji odpadów spełnia praktycznie wszystkie warunki wymagane dyrektywą unijną i rozporządzeniem MŚ i MG[1,2]. Dzisiaj praktycznie nie ma już dyskusji czy w piecu obrotowym można wykorzystywać bez szkody dla środowiska paliwa z odpadów komunalnych i

przemysłowych. Przeprowadzone na świecie badania porównawcze pomiędzy spalaniem odpadów niebezpiecznych, tzw. hazardów w specjalistycznej spalarni i w piecu obrotowym, jednoznacznie potwierdziły przewagę pieca obrotowego. Zaletą, którą nie posiadają inne paleniska jest możliwość podawania paliw w różnej postaci fizycznej i w różnych miejscach procesu. Na rysunku 1 przedstawiono schemat nowoczesnego pieca obrotowego z rodzajem i miejscem dozowania paliw alternatywnych.



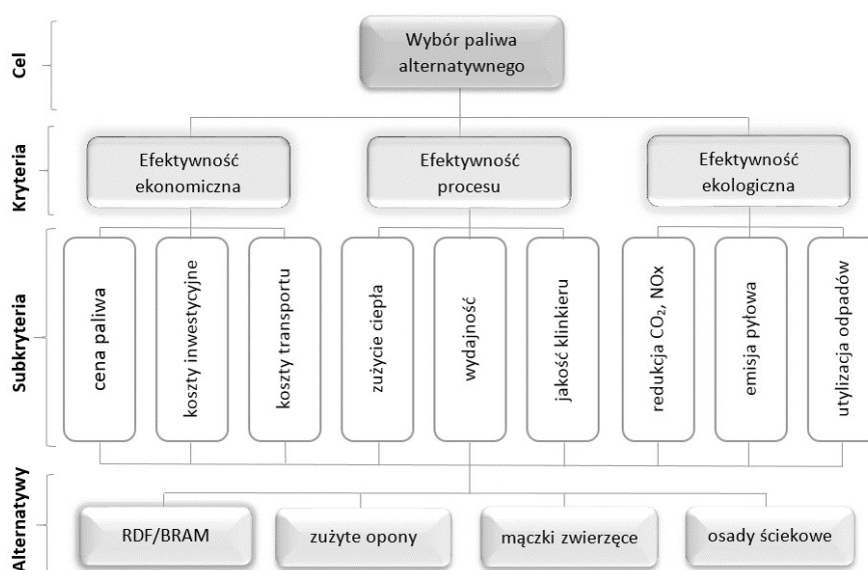
Rys. 1. Schemat technologiczny pieca, rodzaje paliw oraz rozkład temperatury gazów i materiału w piecu
 Źródło: [3]

Do ważniejszych zalet pieca obrotowego oprócz wyżej przedstawionych zalet można zaliczyć jeszcze:

- alkaliczną atmosferę, która neutralizuje gazy kwasotwórcze,
- immobilizację śladowych metali ciężkich w klinkierze,
- całkowite wykorzystanie energii cieplnej z paliwa alternatywnego,
- niskie koszty i krótki czas przystosowania pieca do spalania odpadów,
- wysoką sprawność urządzeń odpylających.

2. Wybór paliwa alternatywnego

Jak wynika z przedstawionego na rysunku 1 sposobu wykorzystania paliw alternatywnych i ich rodzajów, problemem „już jest lub w najbliższym czasie będzie wybór dla danego surowca i technologii wypalania najlepszego paliwa zastępczego. Jak wynika z analiz stosowanych paliw różnią się one nie tylko wartością opałową i postacią fizyczną, ale głównie składem chemicznym, czasem spalania i temperaturą zapłonu. Ważnym argumentem stosowania danego paliwa jest jego jednorodność pod względem własności fizyko-chemicznych i ciągłość dostaw. Jak wynika z przeprowadzonych wstępnych badań dotyczących wyboru najkorzystniejszego pod względem ekologicznym i ekonomicznym jest zadaniem bardzo złożonym. W praktyce opiera się ono głównie na zabezpieczeniu wymaganej ilości i ciągłości dostaw oraz określonego składu chemicznego i rozdrobnienia. Natomiast nie wykorzystuje się metod badawczych do wyboru najlepszego w danych warunkach technologicznych paliwa zastępczego. Metodą taką może być na przykład metoda AHP (ang. Analytic Hierarchy Process - analityczny proces hierarchiczny), która polega na przedstawieniu problemu w postaci modelu decyzyjnego, modelu struktury hierarchicznej, gdzie na szczycie tej struktury znajduje się cel decyzyjny, na niższych poziomach wpływające na niego kryteria i subkryteria. Natomiast podstawę tworzą warianty decyzyjne. Zaletą tej metody jest to, że nie wymaga ona przypisywania wag poszczególnym kryterium i wariantom, co wymagane jest w innych metodach wielokryterialnych [4]. Na rysunku 2 przedstawiono schemat opracowanego modelu hierarchicznego.



Rys. 2. Schemat modelu hierarchicznego

Źródło: opracowanie własne

W oparciu o ten model przeprowadzono wstępnie, znacznie ograniczony wybór paliwa spełniającego przyjęte kryteria. Wybór ograniczono do czterech najczęściej stosowanych w kraju paliw alternatywnych: RDF (ang. Refuse Derived Fuel - paliwo z odpadów)

odpowiednik krajowych paliw typu PASr (paliwa stałe rozdrobnione) i PASi (paliwa stałe impregnowane), osady ściekowe, zużyte opony samochodowe i mączki mięsno-kostne.

Oprócz wyżej przedstawionych własności paliw i warunków technologicznych, które decydują o wyborze paliwa, duże znaczenie mają jego koszty (cena paliwa, koszty transportu, magazynowania i dozowania do pieca) oraz korzyści ekologiczne z termicznej utylizacji odpadów. W oparciu o tabelę 1, która określa wpływ wybranych paliw na proces wypalania, koszty i ekologię określono przez porównanie wartości liczbowe ich wpływu.

Tab. 1. Wpływ paliw alternatywnych na proces, koszty i ekologię

Wpływ \ Paliwo	RDF/ BRAM	Opony	Mączki zwierzęce	Osady ściekowe	
Wartość opałowa	↓	↑	→	→	wpływ pozytywny ↑
Gazy cieplarniane	↑	↑	↑	↑	wpływ negatywny ↓
Bypass (S+Cl)	↓	→	→	→	obojętny →
Redukcja NOx	→	↑	↑	→	
Koszty paliwa	↑	↑	↑	↑	
Przetworzenie do zastosowania	→	↑	→	↓	

Źródło: Opracowanie własne

W oparciu o przedstawiony na rys. 2 model hierarchiczny wyznaczono wariant decyzyjny, który spełniał w najwyższym stopniu przyjęte kryteria. W tym celu dokonano porównań parami na trzech poziomach:

- I - kryteria decyzyjne względem celu decyzyjnego,
- II – subkryteria względem odpowiednich kryteriów,
- III – alternatywy względem każdego subkryterium.

Jak wynika z analizy stosowanych w kraju w przemyśle cementowym paliw alternatywnych, największym powodzeniem cieszą się zużyte opony samochodowe. Jest to paliwo o najwyższej wartości opałowej, dość stabilne pod względem własności fizykochemicznych. Opony okazały się również najlepszym paliwem w naszej analizie wariantowej, co potwierdziło słuszność tej metody. Ze względu jednak na brak dokładnych danych (zwłaszcza kosztów) oraz ograniczoną liczbę ocen – ekspertów, badania te będą zweryfikowane w szerszym zakresie. W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń dla wariantów decyzyjnych.

Uzyskany wynik potwierdził dotychczasowe doświadczenia przemysłu, gdzie prawie we wszystkich cementowniach w Polsce wykorzystuje się jako paliwo zastępcze zużyte opony samochodowe. Tylko w cementowni Chełm i Odra ze względów na ograniczenia wynikające z konstrukcji pieca (Odra) i warunków technologicznych (Chełm) nie wykorzystuje się paliw typu TDF. Ze względu na obserwowany w kraju wzrost ilości

samochodów i wynikający z tego wzrost ilości zużytych opon poszukuje się nowych sposobów ich wykorzystania w procesie wypalania klinkieru.

Tab. 2 Wyniki obliczeń priorytetów globalnych dla wariantów decyzyjnych

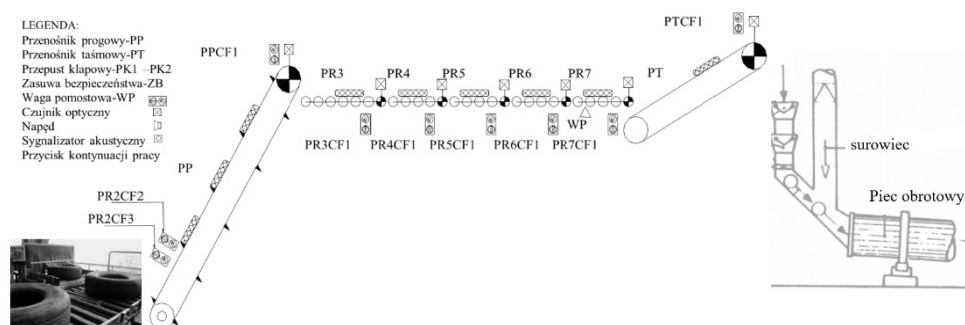
Kryteria	Subkryteria	Priorytety		Oceny			Wyniki				
		Lokalne	Globalne	RDF/ BRAM	Zużyte opony	Mączki zwierzęce	Osady ściekowe	RDF/ BRAM	Zużyte opony	Mączki zwierzęce	Osady ściekowe
Efektywność ekonomiczna 0,53	cena paliwa	0.2970	0.0882	0.2322	0.4950	0.1364	0.1364	0.0205	0.0437	0.0120	0.0120
	koszty transportu	0.1634	0.0485	0.2968	0.4852	0.1090	0.1090	0.0144	0.0235	0.0053	0.0053
Efektywność procesu 0,33	koszty inwestycyjne	0.5396	0.1602	0.2479	0.0776	0.1911	0.4834	0.0397	0.0124	0.0306	0.0775
	zużycie ciepła	0.8795	0.4746	0.0971	0.5320	0.1854	0.1854	0.0461	0.2525	0.0880	0.0880
	wydajność	0.7977	0.4305	0.1031	0.4613	0.2178	0.2178	0.0444	0.1986	0.0937	0.0937
Efektywność ekologiczna 0,14	jakość klinkieru	0.2375	0.1282	0.1155	0.4901	0.1634	0.2310	0.0148	0.0628	0.0209	0.0296
	redukcja CO ₂ ,NO _x	0.8860	0.1448	0.4901	0.1634	0.1155	0.2310	0.0710	0.0237	0.0167	0.0335
	emisja pyłowa	0.8860	0.1448	0.3300	0.1996	0.1404	0.3300	0.0478	0.0289	0.0203	0.0478
	utilizacja odpadów	0.8860	0.1448	0.1404	0.3952	0.2322	0.2322	0.0203	0.0572	0.0336	0.0336
								0.3190	0.7033	0.3213	0.4210

3. Metody utylizacji opon samochodowych w piecu obrotowym

Zużyte opony samochodowe zgodnie z ustawą o odpadach podlegają recyklingowi materiałowemu i energetycznemu. Recykling materiałowy polega na rozdrobieniu mechanicznym i separacji (odzysku gumy i metalu) lub chemicznym odzysku surowców do wytwarzania innych produktów na bazie gumy i kauczuku. Ze względu na stosunkowo wysoką energochłonność recyklingu materiałowego, która w zależności od wielkości opon i zakresu recyklingu wynosi od 110 kWh/Mg opon (tylko rozdrobienie) do około 400 kWh/Mg (rozdrobienie, granulatu + odzysk metalu), jego udział w utylizacji opon jest mały i wynosi tylko 15%. Zużyte opony najczęściej poddawane są recyklingowi energetycznemu. Przewaga termicznego wykorzystania opon samochodowych wynika głównie ze stosunkowo tanich sposobów spalania w porównaniu do energochłonnych technik recyklingu materiałowego oraz wysokiej kaloryczności opon (ok.30 MJ/kg). Istnieje wiele metod termicznego wykorzystania zużytych opon jako paliwo zastępcze w przemyśle cementowym, energetyce czy hutnictwie. Średniej wielkości opona o wadze około 8 kg to równoważnik około 70 kW energii. Odzysk tej energii dokonywany jest najczęściej przez bezpośrednie spalanie opon (rozdrobnionych lub całych) lub w procesie termolizy wytwarza się z nich produkty palne przeznaczone do wykorzystania w innych procesach energetycznych. Najczęściej stosuje się pirolizę opon wraz z innymi odpadami gumowymi skojarzoną z wytwarzaniem ciepła i energii elektrycznej. Natomiast najtańszym i spełniającym wszystkie warunki termicznej utylizacji odpadów jest spalanie opon w procesie wypalania klinkieru w piecu obrotowym. Paliwo z opon tzw. TDF (ang. Tyre Derived Fuel) najczęściej wykorzystywane są bez żadnego przetworzenia w postaci całej opony lub po rozdrobieniu w postaci granulatu. W zależności od postaci TDE wykorzystane może być w palniku głównym pieca (granulat) lub w drugim palenisku tzw. prekalcyntorze (całe opony, granulat).

Wysoka temperatura wypalania, duża pojemność cieplna pieca, długi czas spalania wynikający z wielkości pieca i alkaliczna atmosfera w piecu stwarzają warunki do bezpiecznego spalania TDF, zgodnego z ustawą o termicznej utylizacji odpadów. Oprócz tych warunków, konkurencyjnych w stosunku do innych urządzeń spalających TDF, tylko w piecu obrotowym jest proces całkowicie bezodpadowy. Cała pozostałość po spalaniu

TDF jest zaabsorbowana w wypalonym klinkierze. Nowoczesne piece z zewnętrznym wymiennikiem ciepła stwarzają bardzo dobre warunki do spalania całych opon, które dozowane są za pomocą specjalnych podajników rolkowych do komory wzniosowej łączącej wylot z pieca z wymiennikiem cyklonowym ciepła. Na rysunku 3 przedstawiono schemat układu dozującego TDF w postaci całych opon do pieca obrotowego.



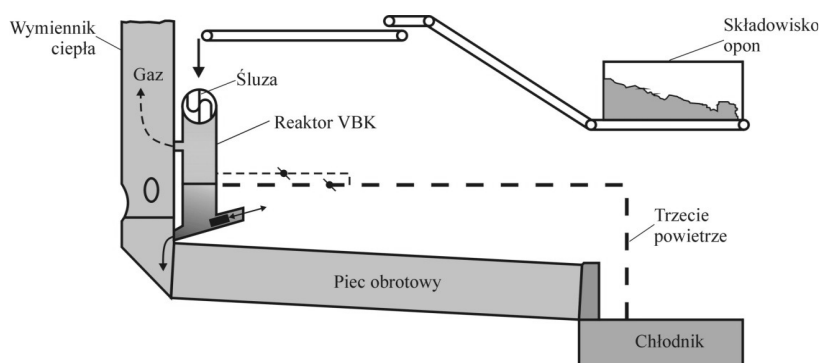
Rys. 3. Schemat instalacji dozowania całych opon do pieca
Źródło: opracowanie własne

Natomiast spalanie TDF w innych paleniskach, wiąże się zawsze z wytwarzaniem kłopotliwych popiołów czy żużli, które wymagają składowania na składowisku odpadów. Dzięki tym warunkom, przemysł cementowy w Polsce jest głównym odbiorcą paliw TDF. Ponad 60% utylizowanych termicznie opon spalana jest w piecu cementowym.

Natomiast przetworzony TDF w postaci granulatu wykorzystywany jest najczęściej w palniku głównym pieca. Ze względu na koszty granulatu jego wykorzystywanie jest uzasadnione tylko wówczas, kiedy nie można zastosować wyżej przedstawionej metody spalania całych opon (np. krótki piec lub piec bez zewnętrznego wymiennika). Piec mimo doskonałych warunków do spalania całych opon, nie może jednak bezkarnie przekroczyć ilości, którą częściowo ogranicza proces technologiczny a dokładnie wymagany rozkład temperatury materiału w poszczególnych strefach pieca, który decyduje o jakości wypalnego klinkieru. Jak wynika z Rys.1 TDF dozowane jest do strefy dekarbonizacji w temperaturę gazów około 1300K. każde znaczące przekroczenie temperatury może spowodować zakłócenie w procesie wypalania i wzrostem strat ciepła z gazami piecowymi. Ze względu na warunki spalania opon wprowadzonych do wysokiej temperatury, która powoduje intensywne odparowanie części lotnych i szybkie ich spalanie co może spowodować znaczący wzrost tlenku węgla w gazach (brak O₂) i miejscowy wzrost temperatury. Dodatkowo wzrost temperatury w wyniku spalanie pozostałości węglowej z TDF (sady), może spowodować wzrost klejenia materiału w „zimnej części” pieca. W związku z tym, ogranicza się maksymalną wielkość opon jakie mogą być w całości dozowane do pieca oraz ich ilość. Jak wynika z doświadczeń krajowych i zagranicznych bezpieczny udział ciepła ze spalania TDF w postaci całych opon wynosi około 15÷20% wymaganego ciepła w procesie wypalania. Z kolei ograniczenie wielkości spalanych opon pozwala równomiernie zasilać piec tym paliwem, co sprzyja zabezpieczeniu jakości klinkieru. Dozowanie znacznie różniących się gabarytami opon a zwłaszcza dużych, które zawierają znaczne ilości żelaza, może spowodować zmiany w składzie mineralicznym klinkieru. Zjawisko to można wyeliminować równomiernym dozowaniem opon zarówno pod względem wielkości jak i ilości. W początkowym okresie wykorzystania opon

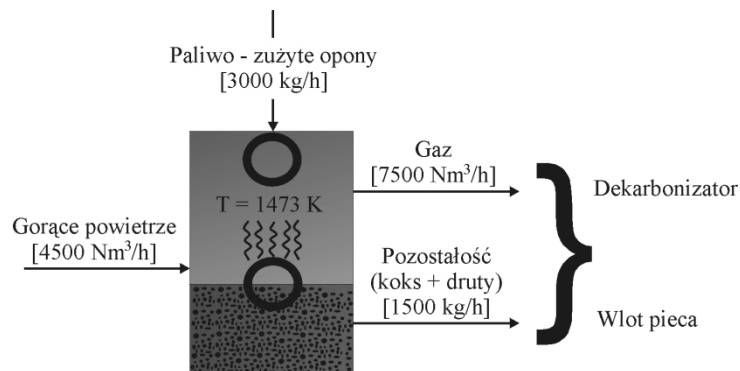
dozowanie odbywało się ręcznie i w zależności od wielkości opony określano czas otwarcia klapy w kanale wrzutowym. Dzisiaj, kiedy cały proces za wyjątkiem podania opon na pierwszy przenośnik rolkowy – wybierający, jest już praktycznie zautomatyzowany, sterowanie odbywa się w oparciu o wagę ostatniej opony podanej do pieca. Oprócz automatycznego sterowania dozowaniem TDF ogranicza się dopuszczalny maksymalny wymiar opon (1250x400) wielkością komory wrzutowej, w której znajdują się dwie dwustopniowe klapy otwierane na zmianę, aby zawsze zabezpieczyć układ przed wypływem gorących gazów w kierunku do dozownika (niebezpieczeństwo zapłonu opon na przenośnikach).

Korzyści z wykorzystania paliw TDF oraz wzrost ilości zużytych opon powodują, że poszukuje się innych sposobów ich wykorzystania, które pozwolą na zwiększenie udziału tych paliw w procesie wypalania klinkieru. Oprócz TDF w postaci granulatu, który również ma pewne ograniczenia ze względu na wielkość cząstek (czas spalania) i koszty, próbuje się nowych technik polegających na przetworzeniu zużytych opon poza piecem na paliwo typu gaz lub olej, które będzie można wykorzystać w znacznie większym zakresie. Na rysunku 4 przedstawiono pierwszą instalację zgazowania zużytych opon, która została wykonana przez zespół badawczy firmy Krupp-Polysius specjalizującej się w projektowaniu i budowie cementowni. Badania przeprowadzono na pracującym piecu obrotowym, który nadbudowano reaktorem VBK (Vorbrennkamer – wstępna komora spalania).



Rys. 4. Schemat instalacji pieca z komorą wstępnego spalania- reaktorem VBK
Źródło: [5]

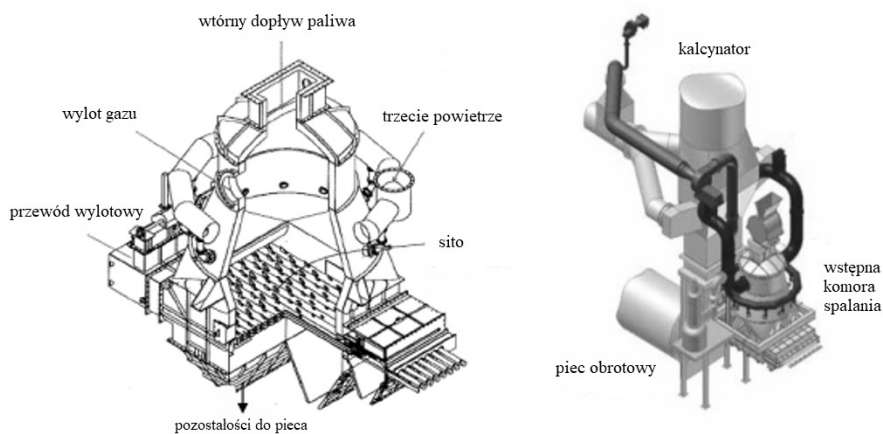
Całe opony dostarczone są do VBK poprzez specjalną szluzę obrotową (typu podawacz celkowy). Do reaktora doprowadzone jest ciepło z powietrzem nadmiarowym z chłodnika klinkieru. W VBK utrzymywana jest atmosfera z ograniczoną ilością O_2 (współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda < 0,2$). Jest to termiczny proces – piroliza, polegający na termicznym rozkładzie bez dostępu powietrza związków gumy do gazów. Na rysunku 5 przedstawiono schematycznie proces zgazowania w reaktorze VBK.



Rys. 5. Proces zgazowania opon w reaktorze VBK

Źródło: [5]

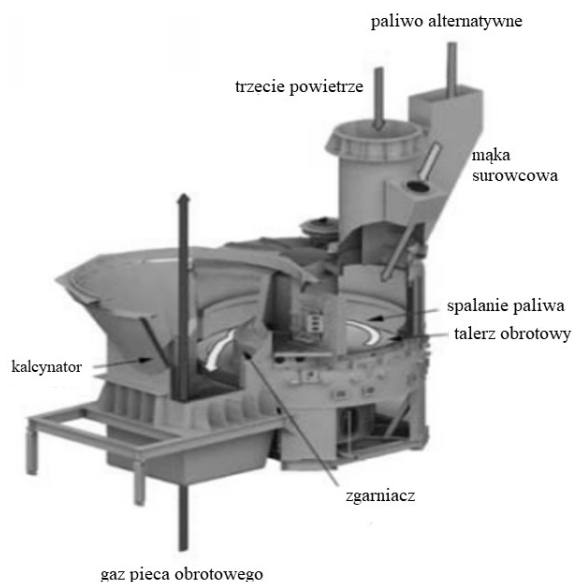
Reaktor ten o wydajności 3 Mg/kg opon został zainstalowany w jednej z cementowni w Szwajcarii. Wydajność zgazowania to około 2,5 m³n/kg opon o kaloryczności 5 MJ/m³n. Pierwsze, zakończone powodzeniem próby zgazowania całych opon i odpadów gumowych w instalacjach nadbudowanych do wymiennika ciepła spowodowały dalszy rozwój podobnych instalacji. Na rys.6 przedstawiono schemat budowy reaktora VBK i sposób nadbudowy tym urządzeniem wymiennika ciepła pieca obrotowego.



Rys. 6. Instalacja PCC i sposób nadbudowy wymiennika pieca tą instalacją

Źródło: [6]

Podobnym rozwiązaniem do VBK jest opracowany przez duńską firmę FLSmidth reaktor Hotdisc, który przeznaczony jest do utylizacji większych odpadów palnych (odpadów komunalnych, gumy i rozdrobnionych opon i całych opon). Na rysunku 7 pokazano konstrukcję Hotdiscu.



Rys. 7. Konstrukcja reaktora HOTDISC
Źródło: [6]

Zasada działania Hotdisc jest podobna do działania reaktora VBK. Różnica polega na obrotowym dnie, które oprócz poprawy wypływu pozostałości do pieca po zgazowaniu, umożliwia za pomocą zmiany obrotów talerza regulować czas przebywania paliw w reaktorze. Wytworzony gaz wykorzystany jest w procesie dekarbonizacji w kalcynatorze, natomiast pozostałość po zgazowaniu podobnie jak w VBK spada do pieca obrotowego. Przedstawione wyżej nowe sposoby wykorzystania paliw alternatywnych w procesie wypalania są szansą na zwiększenie ich udziału w procesie i bezpieczniejsze wykorzystanie.

4. Podsumowanie

Zużyte opony samochodowe, które jeszcze niedawno można było spotkać w lasach czy przydrożnych rowach, dzisiaj są paliwem mogącym być stosowanym w wielu procesach technologicznych. Ze względu na wymagane warunki spalania paliw z opon (TDF) wymagają one energochłonnego przetworzenia. Procesem, który może spalać TDF bez przygotowania, jest proces wypalania klinkieru w piecu obrotowym. Ze względów technologicznych udział tych paliw w postaci całych opon jest ograniczony do 20% zapotrzebowania ciepła. Nowe techniki polegające na zgazowaniu paliw w instalacji, która jest nadbudową istniejącego wymiennika ciepła z kalcynatorem w układzie pieca, stworzyły możliwość znacznego zwiększenia udziału paliw alternatywnych w tym procesie. Ze względu na różnorodność sposobów wykorzystania paliwa TDF celowe będzie przeprowadzenie analizy wielokryterialnej, która będzie pomocna przy podjęciu decyzji o zwiększeniu udziału paliwa z opon w piecu obrotowym.

Literatura

1. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady UE 2015/2193 z dnia 25 listopada 2015 ,
2. Duda J., Kołosowski M., Tomasiak J., System logistyczny w zakładzie segregacji i przeróbki odpadów, LOGISTYKA, nr 3/2015,s.1030-1039,
3. Duda J.; Paliwa alternatywne w przemyśle cementowym. Szkoła Gospodarki Odpadami, 2001, AGH oraz PAN. Kraków – Rytro, 2001.s.27-37.
4. Prusak A., Stefanów P.: AHP – analityczny proces hierarchiczny. Budowa i analiza modeli decyzyjnych, C.H.Beck, ISBN 978-83-255-6072-0, Warszawa, 2014
5. Ruoss F.;Die Vorbrennkammer fur stueckige Brennstoffe-Entwicklungsstand einer neuen Technoloie, Prace IMMB, Opole 2001,nr 31s.112-124.
6. Morten Boberg Larsen.; Alternative Fuels In Cement Production, Printed by Book Partner, Norhaven Digital Copenhagen, 2007, Denmark

Mgr inż. Jacek TOMASIAK

Dr inż. Mariusz KOŁOSOWSKI

Dr inż. Przemysław MALINOWSKI, prof. PWSZ w Nysie

Instytut Nauk Technicznych

Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nysie

48-300 Nysa, ul. Armii Krajowej 7

Tel.: (0-77) 409 11 55

e-mail: jacek.tomasiak@pwsz.nysa.pl,

mariusz.kolosowski@pwsz.nysa.pl,

przemyslaw.malinowski@pwsz.nysa.pl,