
PRACE

**Instytutu Ceramiki
i Materiałów Budowlanych**

Scientific Works
of Institute of Ceramics
and Building Materials

Nr 33
(kwiecień–czerwiec)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus

ISSN 1899-3230

Rok XI

Warszawa–Opole 2018

JACEK TOMASIAK*
MARIUSZ KOŁOSOWSKI**
PRZEMYSŁAW MALINOWSKI***

Ocena wielokryterialna paliw alternatywnych wykorzystywanych w procesie wypalania klinkieru cementowego

Słowa kluczowe: piec obrotowy, paliwa z odpadów, analiza wielokryterialna.

Termiczna utylizacja odpadów lub ich degradacja jest najskuteczniejszym sposobem likwidacji, zgodnym ze zrównoważonym rozwojem. W związku z tym aktualny jest wciąż problem dotyczący poszukiwania najlepszych pod względem ekologicznym i ekonomicznym technik termicznej utylizacji odpadów. Stosowane powszechnie metody oceny przydatności paliw alternatywnych (PA) z odpadów sprowadzają się głównie do wyznaczenia składu chemicznego paliw i produktów spalania oraz powstałych emisji gazowych i pyłowych. Metodą, która pozwoli na znacznie głębszą ocenę przydatności paliwa alternatywnego pod względem technologicznym, ekologicznym i ekonomicznym, może być wielokryterialna ocena AHP (ang. *Analytical Hierarchy Process* – analityczny proces hierarchiczny). W artykule na przykładzie procesu wypalania klinkieru cementowego w piecu obrotowym przedstawiono wyniki oceny wielokryterialnej stosowanych PA, które potwierdzają przydatność metody AHP przy wyborze najkorzystniejszego dla danej technologii paliwa.

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach, obserwuje się duże zainteresowanie przemysłu cementowego w rozwiązywaniu trudnego problemu dotyczącego utylizacji odpadów z innych gałęzi przemysłowych. Ważnym czynnikiem szerokiego wykorzystania w procesie produkcji cementu odpadów jest zgodnie z ideą zrównoważonego rozwoju

* Mgr inż., Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nysie, jacek.tomasiak@pwsz.nysa.pl

** Dr inż., Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nysie, mariusz.kolosowski@pwsz.nysa.pl

*** Dr inż., prof. PWSZ, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nysie, przemyslaw.malinowski@pwsz.nysa.pl

ograniczenie zużycia naturalnych, nieodnawialnych – kopalnych – surowców i paliw.

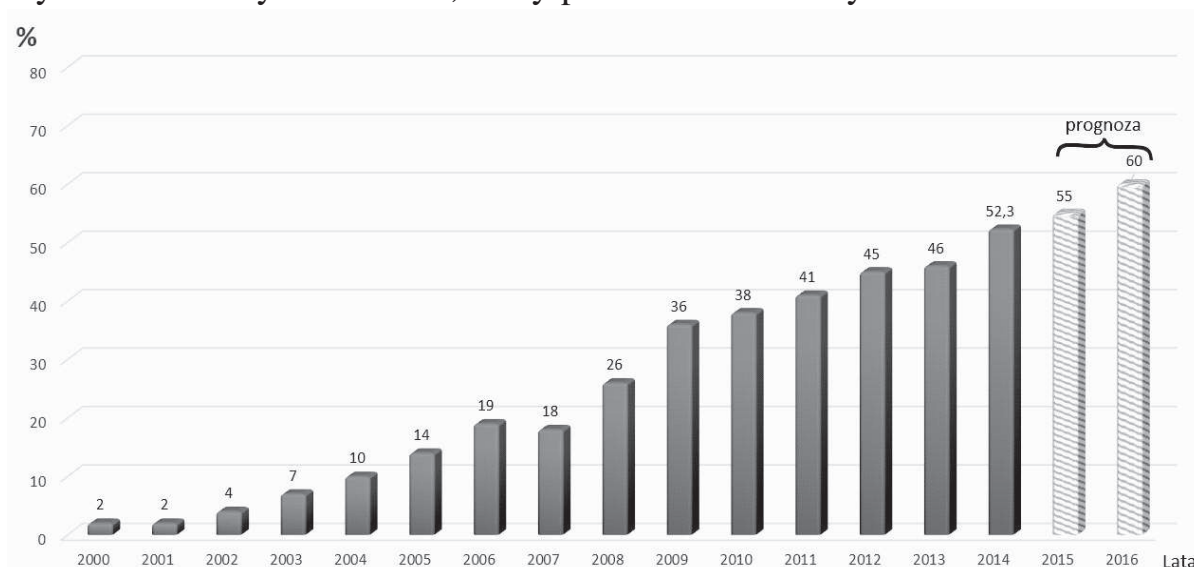
Jeszcze pod koniec XX w. wykorzystanie odpadów przemysłowych – palnych w przemyśle cementowym w Polsce w stosunku do większości krajów europejskich było bardzo niskie i wynosiło niecałe 2%. Nie wynikało to tylko z braku wiedzy o możliwościach oraz korzyściach ekonomicznych i ekologicznych wynikających z wykorzystania paliw alternatywnych. Główną przyczyną takiego stanu był duży opór społeczny dotyczący termicznej utylizacji odpadów. Przeprowadzone równoległe z modernizacją przemysłu cementowego szerokie konsultacje ze społeczeństwem lokalnym, na temat korzyści wynikających z włączenia się przemysłu cementowego do problemu utylizacji odpadów, spowodowały zmianę stosunku społeczeństwa do wykorzystania paliw alternatywnych w cementowniach. Cementownie, które jeszcze niedawno kojarzone były z zakładami uciążliwymi dla środowiska, dzięki utylizacji znacznych ilości odpadów przemysłowych i komunalnych okazały się przyjazne dla środowiska.

Wykorzystanie paliw alternatywnych jako zamiennika surowców naturalnych do produkcji klinkieru wpływa m.in. na poprawę efektywności energetycznej, ekonomicznej i ekologicznej. Jednak bardzo istotną rolę odgrywa rodzaj zastosowanego PA, jego własności fizyczne, skład chemiczny czy wartość opałowa. Podjęcie decyzji o wyborze PA nie jest procesem jednowymiarowym, lecz wielowymiarowym. Związane jest to, z jednej strony, z ilością czynników wpływających na decyzję, a z drugiej z liczbą decydentów. W tym celu możemy wykorzystać analizę wielokryterialną, która pomoże nam w wyborze optymalnego PA. W literaturze przedmiotu nie znaleziono systemowego podejścia do wyboru najkorzystniejszego PA. Najczęściej jednak do rozwiązywania problemów decyzyjnych w zakresie planowania energii odnawialnej, alokacji zasobów energetycznych lub do celów zrównoważonego zarządzania energią wybieraną metodą wspomagającą daną decyzję jest AHP [1].

2. Wykorzystanie paliw alternatywnych w procesie wypalania klinkieru

Wysoka energochłonność produkcji cementu, stały wzrost cen paliw kopalnych powodują, że wykorzystanie paliw alternatywnych z odpadów jest obecnie w krajach UE jednym z głównych działań przemysłu w kierunku poprawy efektywności produkcji (obniżenia kosztów), ograniczenia zużycia paliw kopalnych – nieodnawialnych oraz ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. O celowości wykorzystania paliw alternatywnych w procesie produkcji cementu w Europie świadczy intensywność wzrostu ich wykorzystania. Jeszcze w 1990 r. zużycie paliw alternatywnych w Europie wynosiło niecałe 3% przy 97% zużyciu paliw kopalnych. Natomiast już w 2013 r. paliwa alternatywne w przemyśle cemento-

wym w krajach UE stowarzyszonych w CEMBUREAU zabezpieczały ok. 35% ciepła. Podobnie wygląda wzrost wykorzystania paliw alternatywnych w przemyśle cementowym w Polsce, który przedstawiono na rycinie 1.

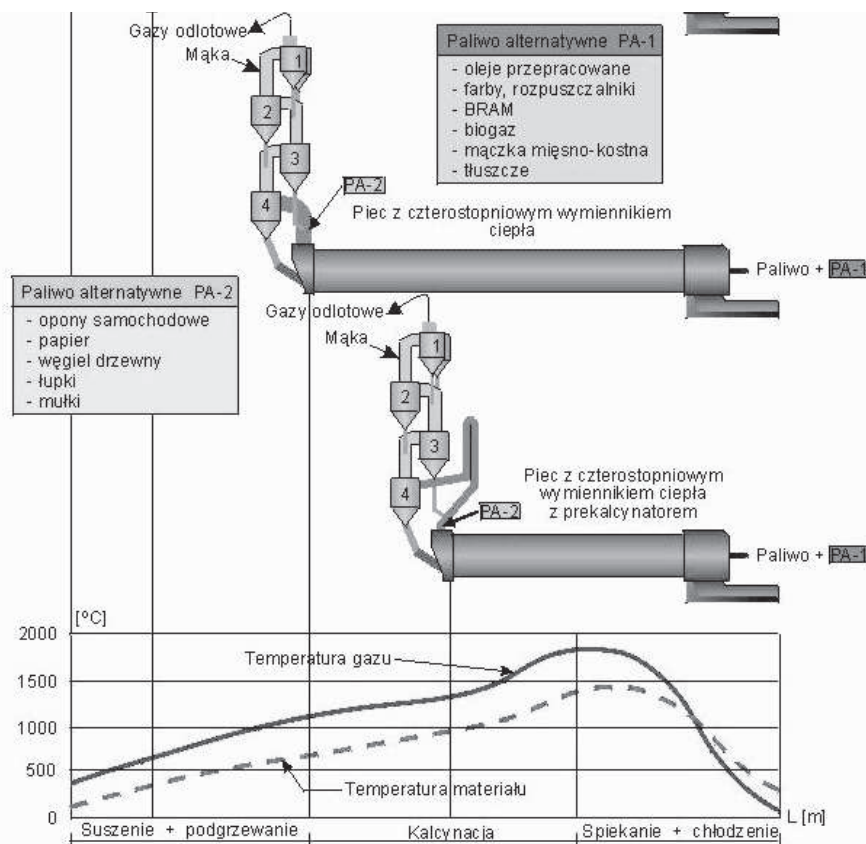


Ź r ó d ł o: Opracowanie własne na podstawie danych Stowarzyszenia Producentów Cementu i prognoz.

Ryc. 1. Udział paliw alternatywnych w procesie wypalania klinkieru w Polsce

W roku 2000 paliwa alternatywne w procesie wypalania klinkieru w Polsce stanowiły niecałe 2%, natomiast już w 2012 r. zabezpieczały ponad 45% ciepła, co było drugim – za niemieckim przemysłem cementowym (62% ciepła z PA) – wynikiem w UE [2]. Aktualnie wszystkie cementownie w kraju wykorzystują paliwa z odpadów. W poszczególnych cementowniach udział ten jest różny i w zależności od parametrów technicznych pieca i stosowanej technologii wypalania wynosi od 30 do ponad 80% (średnie zużycie w kraju to obecnie ponad 50%). Taki znaczący udział paliw alternatywnych w piecu obrotowym jest możliwy dzięki warunkom, jakie stwarza wysokotemperaturowy proces wypalania klinkieru. Na rycinie 2 przedstawiono warunki temperaturowe w typowych piecach obrotowych oraz rodzaje paliw i sposoby ich wykorzystania w procesie wypalania klinkieru cementowego [3–4]. Wysoka temperatura spalin – gazów piecowych i wypalanego surowca – w piecu obrotowym oraz wynikający z rozmiarów pieca i technologii wypalania długi czas przebywania w tej temperaturze (ok. 7–10 s) powodują, że piec obrotowy spełnia praktycznie warunki do destrukcji związków toksycznych – dioksyn (PCDD) i furanów (PCDF). Zgodnie z Dyrektywą europejską dotyczącą spalania odpadów, jednym z warunków destrukcji powstałych w procesie spalania odpadów związków toksycznych jest zabezpieczenie czasu przebywania spalin w odpowiedniej temperaturze, która zależy od zawartości chloru w paliwie – ponad 2 sekundy. Dla odpadów zawierających poniżej 1% masy związków chlorowcoorganicznych w przeliczeniu na

chlor wymagana jest temperatura 850°C . Natomiast dla zawartości $\text{Cl} > 1\%$ wymaganą temperaturą powinno być $> 1100^{\circ}\text{C}$ [5].



Ryc. 2. Rozkład temperatury i sposób wykorzystania paliw alternatywnych w typowych krajowych piecach obrotowych [3]

Jak wynika z danych przedstawionych na rycinie 2, praktycznie wszystkie typy pieców obrotowych w cementowniach zabezpieczają wymagane warunki. Oprócz destrukcji związków toksycznych, piec obrotowy posiada jeszcze wiele innych zalet, które przemawiają za wykorzystaniem go w procesie paliw alternatywnych z odpadów. Ważną zaletą pieca obrotowego jest duża pojemność cieplna, która zabezpiecza ciągłość spalania, nawet przy zaniku płomienia w palniku. W stosunku do innych metod współspalania lub spalania odpadów w spalarni, zalety cementowego pieca obrotowego są następujące:

- alkaliczna atmosfera, która neutralizuje gazy kwasotwórcze,
- brak produktów spalania, popiół całkowicie zostaje wbudowany w klinkier,
- całkowite wykorzystanie energii cieplnej z paliwa alternatywnego,
- niskie koszty i krótki czas przystosowania pieca do spalania odpadów,
- współspalanie paliwa z odpadów w piecu obrotowym nie wymaga dodatkowego paleniska i tym samym nie powoduje wzrostu emisji gazowej,
- wysoka sprawność urządzeń odpylających.

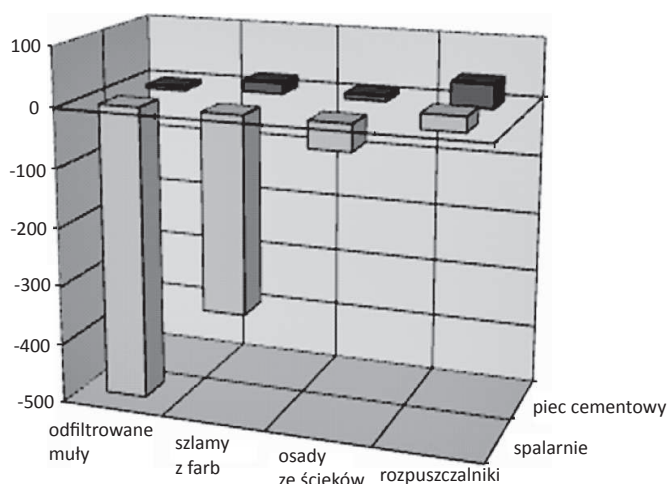
Wynika z tego, że piec obrotowy jest nie tylko doskonałym urządzeniem do spalania paliw alternatywnych, ale spełnia praktycznie wszystkie teoretyczne wymagania stawiane przy spalaniu odpadów niebezpiecznych, np. zawierających PCB. Zgodnie z krajowymi przepisami, które dopuszczają współspalanie w piecu obrotowym odpadów innych niż niebezpieczne, istniejące warunki znacznie przekraczają ustalone wymagania, co pozwala na szerokie wykorzystanie różnych odpadów w tym procesie. Ze względu na wysoką wartość opałową, stosunkowo dużą stabilność właściwości fizykochemicznych oraz dobre właściwości transportowe i łatwość dozowania, najczęściej w krajach EU wykorzystuje się jako paliwo alternatywne odpady: gumowe (zużyte opony samochodowe), zwierzęce (mączki mięsno-kostne, tłuszcze zwierzęce), wysuszone osady z oczyszczalni ścieków komunalnych lub przeprowadzone oleje.

W ostatnich latach obserwuje się wzrost udziału paliw z przetworzonych odpadów komunalnych. Korzyści energetyczne i ekologiczne, jakie wynikają ze stosowania alternatywnych źródeł energii, spowodowały intensywny rozwój zakładów przetwarzających odpady przemysłowe i komunalne na paliwa zstępne typu PASi (paliwo alternatywne stale impregnowane) lub PASr (paliwo alternatywne stale rozdrobnione). Odpowiednikiem tych paliw w krajach UE jest paliwo typu RDF (ang. *Refuse Derived Fuel* – paliwo z odpadów) lub BRAM (niem. *Brennstoff aus Mull* – paliwo z odpadów komunalnych).

3. Zalety pieca obrotowego w procesie współspalania paliw alternatywnych

Po początkowym, trudnym w Polsce okresie dla stosowania paliw alternatywnych w ostatnich latach nastąpił bardzo intensywny wzrost ich wykorzystania i rozwój nowych technik współspalania. Termiczna utylizacja odpadów w UE ma ciągle jeszcze zrównoważonych zwolenników, jak i przeciwników. Pozytywne wyniki z przeprowadzonych testów w cementowniach spalających odpady oraz coraz większe wykorzystywanie pieców obrotowych do utylizacji odpadów niebezpiecznych (zwłaszcza w USA), spowodowało, że do protestów społeczności lokalnych dołączyły się spółki z wodami. Dla z wodami spalającymi odpady przemysł cementowy stał się dużym konkurentem, w związku z czym spotykamy się często jeszcze dyskusje o niekorzystnym wpływie współspalania odpadów na środowisko oraz o niskiej efektywności ekonomicznej i szkodliwym wpływie tych paliw na jakość cementu. Wszystkie te opinie zostały jednoznacznie obalone przez niezależne świadczone ośrodki badań, specjalizujące się w badaniach wpływu procesów termicznej utylizacji odpadów na środowisko. Dla przykładu na rycinie 3 przedstawiono wyniki porównań dotyczące spalania niebezpiecznych odpadów płynnych w cementowym piecu obrotowym i specjalistycznej spalarni odpadów niebezpiecznych. Badania te przeprowadzone zostały przez

holenderską niezależną organizację badawczą (The Netherlands Organization for Applied Scientific Research – Instytut TNO). Dodatni efekt świadczy o pozytywnym wpływie procesu na środowisko, natomiast ujemny o szkodliwym oddziaływaniu. Z przedstawionych danych wynika, że współspalanie tych odpadów w procesie wypalania klinkieru, we wszystkich próbach, okazało się zdecydowanie korzystniejsze od spalania w specjalistycznej spalarni odpadów. Podobne badania przeprowadzona w jednej z cementowni norweskich, w której 15% węgla zastąpiono niebezpiecznymi odpadami płynnymi zawierającymi PCB (polichlorowane bifenyle)



Ryc. 3. Wyniki testu porównawczego spalania odpadów w spalarni i cementowni [3]

Zastąpienie 15% węgla odpadami niebezpiecznymi zawierającymi PCB nie spowodowało żadnych przekroczeń dopuszczalnych emisji ani zawartości niebezpiecznych związków w klinkierze oraz w pyłe z elektrofiltra. W niektórych przypadkach stwierdzono niższe emisje niż przy spalaniu tylko węgla. Oprócz wysokiego stopnia rozkładu PCB powyżej 99,999%, stwierdzono również ograniczenie emisji pyłów z pieca [6].

Podobne wyniki dotyczące wykorzystania procesu wypalania klinkieru do utylizacji odpadów niebezpiecznych zostały potwierdzone przez Państwowy Departament Florydy dla Regulacji Środowiska. Badania te obejmowały kontrolę [7]:

- wpływu współspalania węgla i odpadów na skuteczność rozkładu i usuwania szkodliwych związków PCDD i PCDF,
- stężenia pyłów, SO_2 , NO_x , HCl oraz metali ciężkich w gazach odlotowych,
- koncentracji i rozkładu metali i chlorków w linii technologicznej.

Uzyskany stopień rozkładu DRE (*Destruction and Removal Efficiency Factor*) spełniał ostre standardy Amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska i wynosił 99,99–99,9999%. Dzięki tym własnościom, ponad 20% pieców cementowych w USA stale lub okresowo spala tzw. hazardy – paliwa z odpadów niebezpiecz-

nych, zawierające m.in. węglowodory chlorowcowane, środki farmaceutyczne czy oleje z PCB.

Sprzyjające w cementowych piecach obrotowych warunki do wykorzystywania paliw alternatywnych nie zwalniają cementowni od bieżącej kontroli wypełnienia standardów UE dotyczących ochrony środowiska zdefiniowanych w: Dyrektywie zintegrowanego zapobiegania i kontroli zanieczyszczeń IPPC/BAT 96/61/EC oraz Dyrektywie 2000/76/EC dotyczącej spalania odpadów. W związku z tym, wszystkie cementownie w kraju wyposażone są w aparaturę kontrolno-pomiarową, która zabezpiecza odpowiedni nadzór nad procesem i zabezpiecza utrzymywanie emisji na dopuszczalnym poziomie.

4. Wpływ wybranych parametrów PA na proces wypalania klinkieru

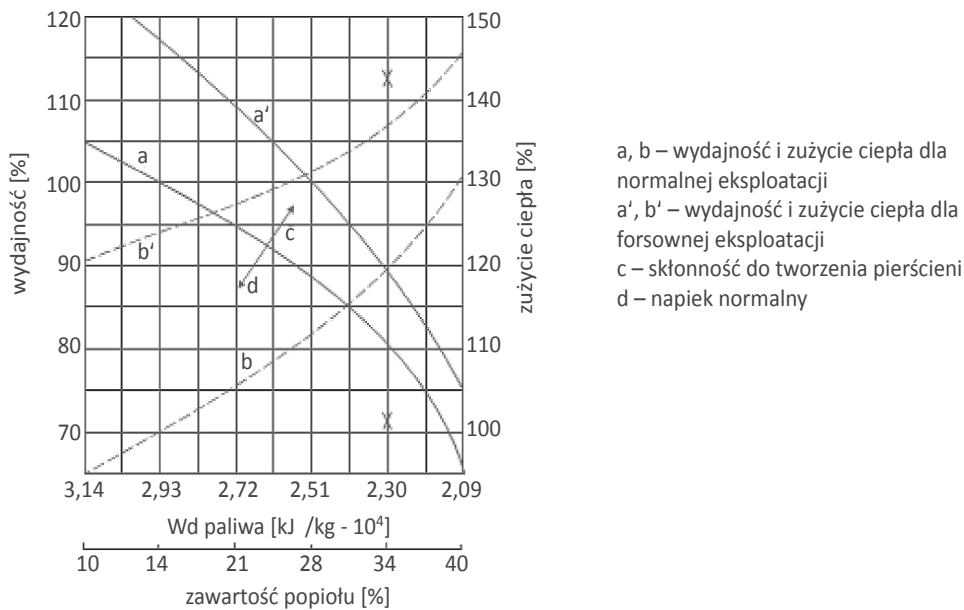
Dzisiaj, po prawie dwudziestoletnim już pozytywnym doświadczeniu współspalania węgla i paliw alternatywnych oraz z coraz lepszą jakością i dostępnością różnego rodzaju przetworzonych PA, przed przemysłem cementowym stoi nowe trudne zadanie, polegające na wyborze najlepszego dla danych warunków technologicznych paliwa z odpadów. Pomimo przedstawionych wyżej zalet procesu wypalania klinkieru i zdobytych doświadczeń ze spalania PA, nie jest to zadanie łatwe. Złożoność procesu wynika między innymi z tego, że zadaniem współspalania nie jest utylizacja odpadów tylko wyprodukowanie dobrej jakości i taniego klinkieru, który ma decydujący wpływ na jakość i koszty cementu. Natomiast utylizacja odpadów jest efektem pośrednim, wynikającym z współspalania z udziałem PA. Ponieważ efektywność wykorzystania paliw alternatywnych jest stosunkowo wysoka, wybór ogranicza się praktycznie do dostawcy, który zabezpieczy wymaganą ilość, ciągłość dostaw i wymagane parametry fizykochemiczne oraz odpowiednią cenę tych paliw.

Z technologicznego punktu widzenia paliwo alternatywne można scharakteryzować za pomocą:

- składu chemicznego, jego zmienności oraz własności produktów spalania,
- własności fizycznych,
- wartości opałowej,

Parametrem, który decyduje o efektywności stosowania paliwa alternatywnego jest wartość opałowa. Teoretycznie, dolną granicą wartości opałowej PA, które może być spalane w piecu obrotowym, jest wartość zabezpieczająca spalanie autotermiczne ($W_d > 6,5 \text{ MJ/kg}$). Ze względu jednak na wymagany rozkład temperatury materiału w poszczególnych strefach pieca, który decyduje o jakości klinkieru, minimalna wartość opałowa paliwa w palniku głównym (mieszanki:

węgiel + PA) powinna wynosić co najmniej 21 MJ/kg. Na rycinie 4 przedstawiono wpływ W_d na zużycie ciepła i wydajność pieca [8].



Ryc. 4. Wpływ wartości opałowej na zużycie ciepła i wydajność pieca [8]

W zależności od składu chemicznego i wartości opałowej paliwa alternatywnego może być ono, zgodnie z ryciną 2, stosowane w palniku głównym (PA1) lub w tzw. palniku wtórnym w prekalcyntorze (PA2).

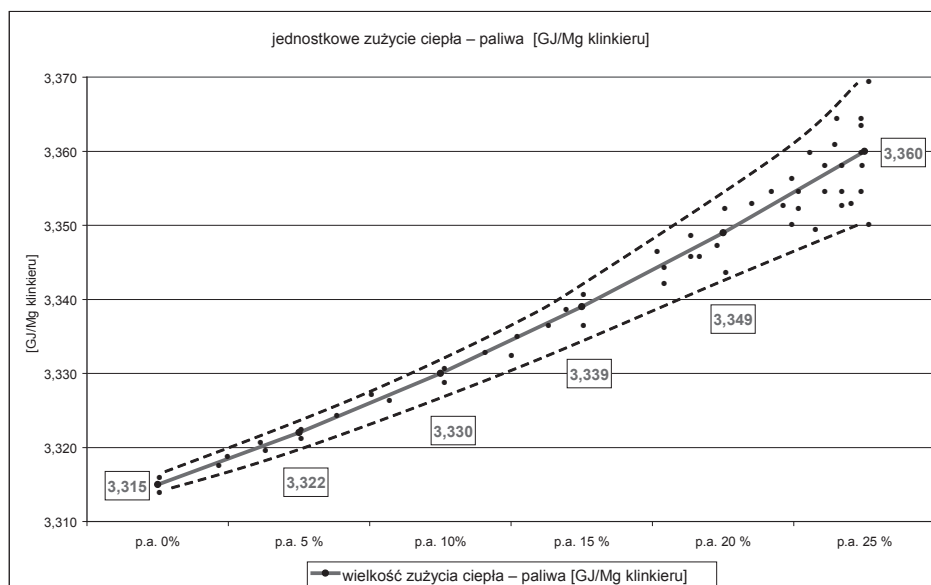
Z doświadczeń krajów zrzeszonych w CEMBUREAU, paliwa te muszą charakteryzować się następującymi parametrami [3]:

- średnia wartość opałowa > 13 MJ/kg (min. 12 MJ/kg z dostawy),
- wilgoć < 30%,
- CL < 0,3%,
- S < 2,5%,
- metale ciężkie < 2500 ppm,
- PCB + PCT < 50 ppm
- Hg < 10 ppm,
- Cd + Tl + Hg < 100 ppm.

Mimo sprzyjających warunków do współspalania węgla + PA w piecu obrotowym, udział w procesie wypalania klinkieru paliw alternatywnych ma wiele ograniczeń technologicznych. Niska wartość opałowa PA wymaga zastosowania paliwa technologicznego – węgla o wyższej wartości opałowej, która zabezpiecza uzyskanie minimalnej dopuszczalnej wartości opałowej > 21 MJ/kg.

Zgodnie z przedstawionym na rycinie 4 wykresem, obniżenie wartości opałowej paliwa w palniku głównym pieca powoduje wzrost zużycia ciepła i spadek wydajności pieca.

Jak wynika z danych literaturowych, zastosowanie paliwa alternatywnego o wartości opałowej 13 MJ/kg pozwala ograniczyć zużycie węgla na poziomie ok. 10%. Natomiast efektem zastosowania PA o wartości ok. 18 MJ/kg, jest już ok. 20% ograniczenie zużycia węgla. Na rycinie 5 przedstawiono wpływ wartości opałowej PA i jego udziału w procesie na zużycie ciepła.



Ryc. 5. Jednostkowe zużycie ciepła w zależności od poziomu konsumpcji paliw alternatywnych [9]

Z przedstawionych danych wynika, że już 15% udział paliwa typu RDF powoduje ok. 10% wzrost zużycia ciepła. Wynikiem spalania paliwa o niższej wartości opałowej jest ok. 15% wzrost ilości gazów odlotowych z pieca, co powoduje znaczny (ok. 30%) wzrost oporów hydraulicznych wymiennika ciepła. Często, ze względu na ograniczenia wynikające z parametrów wentylatora piecowego, wzrost ilości gazów i oporów hydraulicznych skutkuje obniżeniem udziału paliw PA lub obniżeniem wydajności pieca. Innym istotnym ograniczeniem stosowania paliw alternatywnych jest stopień rozdrobnienia i wynikający z tego czas spalania. W zależności od miejsca wykorzystania PA (patrz ryc. 2) stopień rozdrobnienia jest różny. Dotyczy to szczególnie paliw RDF i rozdrobnionych odpadów gumowych stosowanych w palniku głównym PA1, które ze względu na niebezpieczeństwo niecałkowitego spalania powinny być rozdrobnione do wymiarów 0–10 mm. Natomiast w palniku PA2 zalecane rozdrobnienie to 0–100 mm. Złożoność procesu wypalania oraz duża różnorodność pod względem własności fizykochemicznych paliw alternatywnych powoduje, że wybór rodzaju paliwa alternatywnego i sposobu jego wykorzystania jest zagadnieniem trudnym.

5. Metoda AHP narzędziem do wyboru optymalnego paliwa alternatywnego

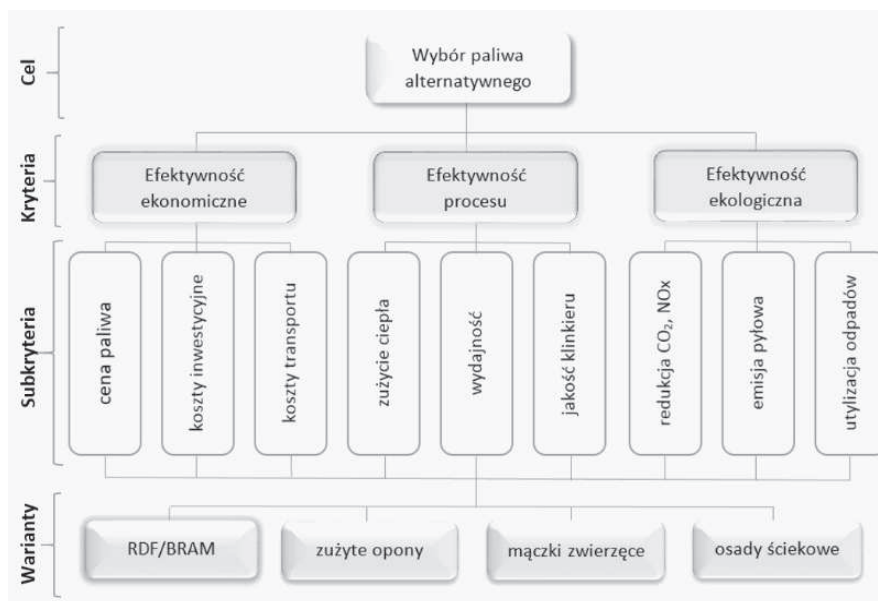
Dotychczas brak jest systemowego podejścia do wyboru najkorzystniejszego paliwa. Ze względu na wiele różnych czynników, które decydują o przydatności danego paliwa alternatywnego w procesie wypalania klinkieru cementowego, trudno jest znaleźć odpowiedź optymalną, przyjmując tylko jedno kryterium – opłacalność (koszty). Proces współspalania węgla + PA w piecu obrotowym jest typowym przykładem, gdzie metody analiz wielokryteriowych mogą być pomocne przy wyborze najlepszego paliwa alternatywnego, zarówno pod względem ekonomicznym, ekologicznym, jak i jakości cementu. Jedną z takich metod może być metoda AHP, która polega na przedstawieniu problemu w postaci modelu decyzyjnego – modelu struktury hierarchicznej, gdzie na szczycie tej struktury znajduje się cel decyzyjny, a na niższych poziomach wpływające na niego kryteria i subkryteria. Natomiast podstawę tworzą wartości decyzyjne. Zletą tej metody jest to, że nie wymagają przypisywania wag poszczególnym kryteriom i wartościom, co wymagane jest w innych metodach wielokryteriowych [10].

Tworzenie modelu hierarchicznego wymaga szerokiej wiedzy eksperckiej z zakresu rozwiązywanego problemu. Ciał trudność tej metody polega na budowie modelu hierarchicznego, który wymaga zdefiniowania elementów (kryteriów i subkryteriów) modelu i powiązań między elementami. Zbudowanie takiego modelu wymaga od autorów, oprócz wiedzy merytorycznej, doświadczenia, kreatywności – umiejętności logicznego myślenia oraz umiejętności weryfikacji z innymi podobnymi decyzjami. Budowa modelu AHP sprowadza się do określenia struktury podporządkowania elementów od ogólnych, umieszczonych w górnej części modelu do szczegółowych umieszczonych w dolnej części. Jest to stosunkowo proste w zastosowaniu narzędziem, pozwalając na wspomaganie decyzji wyboru różnych rozwiązań gospodarczych. Sprowadza się one do porównania par elementów na tym samym niższym poziomie, względem elementów na poziomie wyższym, które jest wyrażone w skali liczbowej. Elementy porównuje się z pomocą ich wartości ustalonych przez twórcę metody Saaty'ego według następujących wartości liczbowych:

- równoważność wartości – 1,
- umiarkowane przewyższenie – 3,
- silne przewyższenie – 5
- bardzo silne przewyższenie – 7,
- krytyczne przewyższenie – 9,
- 2, 4, 6, 8 – wartości pośrednie.

Ocena polega na względnym porównaniu par elementów. Im wyższa wartość, tym większy wpływ na badany proces.

W pracy przedstawiono przykład wykorzystania modelu AHP do wyboru najkorzystniejszego paliwa alternatywnego dla cementowni. Analizie poddano typowe PA mogące być lub już jest stosowane w cementowniach w Polsce. W przedstawionym na rycinie 6 schemacie hierarchicznym modelu AHP do wyboru paliwa alternatywnego przyjęto 4 warianty paliw PA. Poza bardzo popularnymi paliwami typu RDF i zużytymi oponami, w analizie uwzględniono dodatkowo mączki mięsno-kostne i osady ściekowe, są to paliwa alternatywne, które dotychczas nie znalazły jeszcze w kraju większego zastosowania. Uwzględniając jednak stały wzrost ilości tych odpadów, a zwłaszcza osadów ściekowych, należy już dzisiaj poszukiwać sposobów ich utylizacji. Rozbudowa w ostatnich latach sieci kanalizacyjnych i oczyszczalni ścieków oraz unijny zakaz wykorzystywania osadów ściekowych na cele rolnicze oraz składowania na składowiskach odpadów, spowodował znaczny wzrost osadów wymagających zagospodarowania – termicznej utylizacji. Przemysł cementowy może być ratunkiem dla oczyszczalni ścieków, które już dzisiaj mają z osadami duże problemy [11].



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 6. Schemat modelu hierarchicznego

Na wybór optymalnego paliwa, oprócz przedstawionych wyżej problemów technologicznych wynikających ze stosowania PA, duży wpływ ma efekt ekologiczny i całkowite koszty związane z zakupem paliwa, transportem, magazynowaniem oraz z instalacją dozowania do pieca. Określenie wartości liczbowych porównujących poszczególne warianty oparto na tabeli 1, która charakteryzuje wpływy poszczególnych paliw i ich własności na proces, koszty i ekologię.

Tabela 1

Wpływ paliw alternatywnych na proces, koszty i ekologię

Wpływ	Paliwo			
	RDF	opony	mączki zwierzęce	osady ściekowe
Wartość opałowa	↓	↑	→	→
Redukcja CO ₂	↑	↑	↑	↑
Bypass (S+Cl)	↓	→	→	→
Redukcja NO _x	→	↑	↑	→
Koszty paliwa	↑	↑	↑	↑
Przetworzenie do zastosowania	→	↑	→	↓

↑ wpływ pozytywny

↓ wpływ negatywny

→ obojętny

Źródło: Opracowanie własne.

Przedstawiony na rycinie 6 model hierarchiczny AHP stanowił bazę do wyznaczenia takiego wariantu decyzyjnego, który w najwyższym stopniu będzie spełniał kryteria i subkryteria. W tym celu dokonano porównań parami na trzech poziomach:

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

Do uzyskania jak największej poprawności porównań wykorzystano metodę mnożenia macierzy zalecaną przez Saaty'ego. Polega ona na kilkakrotnym przemnożeniu macierzy danych (porównań parami), wyznaczeniu współczynników wagowych i sprawdzeniu poprawności danych [12]. Przykład mnożenia macierzy dla kryterium efektywność ekonomiczna przedstawia macierz A_{k1} :

$$A_{k1} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1/5 \\ 1/2 & 1 & 1/4 \\ 5 & 4 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1/5 \\ 1/2 & 1 & 1/4 \\ 5 & 4 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 4,8 & 0,9 \\ 2,25 & 3 & 0,6 \\ 12 & 18 & 3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

W metodzie AHP poprawność danych sprawdzana jest przez analizę „wewnętrznej sprzeczności” (*inconsistency*) macierzy porównań. Ma to zasadniczy wpływ na ostateczny wybór wariantu decyzyjnego. W tym celu wykorzystuje się współczynnik zgodności CR (*consistency ratio*) do sprawdzenia spójności macierzy

porównań. Jeżeli wartość współczynnika $CR > 0,1$, to według Saaty'ego otrzymane wyniki są nielogiczne i należy je odrzucić. Do wyznaczenia wartości CR stosuje się następującą zależność:

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad (2)$$

gdzie:

CR – współczynnik zgodności,

CI – indeks zgodności,

RI – stabilizowana wielkość zależna od liczby porównywalnych elementów,

λ_{max} – największa wartość własna macierzy porównań,

n – liczba porównywanych elementów.

Przykład macierzy porównań wraz z wartościami priorytetów lokalnych i globalnych oraz współczynnikami CR i CI dla kryterium – efektywność ekonomiczna przedstawiono w tabeli 2. Priorytety lokalne to wartości określające relacje względem elementu położonego o jeden poziom wyżej w strukturze hierarchicznej, a priorytety globalne określają stopień ważności elementów zlokalizowanych o więcej niż jeden poziom.

Tabela 2

Wyniki subkryteriów pod względem kryterium efektywność ekonomiczna opon

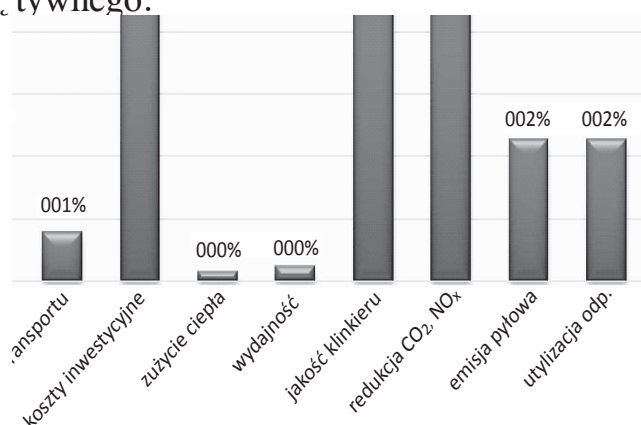
Efektywność ekonomiczna 0,53	Cena paliwa	Koszty transportu	Koszty inwestycyjne	Priorytety	
				lokalne	globalne
Cena paliwa	1	2	1/5	0,18648	0,09843
Koszty transportu	1/2	1	1/4	0,12654	0,06679
Koszty inwestycyjne	5	4	1	0,68698	0,36261
CI = 0,0470, CR = 0,0904					

Źródło: Opracowanie własne.

W metodzie AHP wymagane jest na każdym etapie tworzenia macierzy porównań parami wyznaczenie współczynnika CR . Na rycinie 7 przedstawiono wartości współczynników CR dla porównań subkryteriów i paliw alternatywnych, z których wynika, że przeprowadzone obliczenia wykonano prawidłowo ($CR < 10\%$), jednak duże rozbieżności współczynników mogą wskazywać na pewien zakres błędów, co szerzej jest omawiane w literaturze przedmiotu.

Ocenę końcową wyboru najlepszego paliwa alternatywnego dokonano poprzez sumowanie iloczynów współczynników wagowych każdego wariantu decyzyjnego (tab. 3). Wyniki wskazują, że na wybór najlepszego paliwa alternatywnego największy wpływ ma efektywność ekonomiczna (53%), na drugim miejscu jest efektywność procesu (33%), najmniejsze zaś znaczenia ma efektywność ekologiczna (14%). Paliwo alternatywne, które uzyskało najwyższy priorytet to zużyte opony – 70,3%, na drugim miejscu osady ściekowe – 42,1%, na końcu podobny priorytet uzyskały mączki zwierzęce oraz RDF/BRAM ok. 32%.

Subkryteria związane z efektywnością procesu – zużycie ciepła (25,2%) i wydajność (19,8%) miały największe znaczenie w zakresie wyboru najlepszego planu alternatywnego.



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 7. Wartość współczynnika CR dla subkryteriów

Tabela 3

Wyniki obliczeń priorytetów globalnych dla wariantów decyzyjnych

Kryterium	Subkryteria	Priorytety		Oceny				Wyniki			
		lok. lne	glob. lne	RDF/BRAM	zużyte opony	mączki zwierzęce	osady ściekowe	RDF/BRAM	zużyte opony	mączki zwierzęce	osady ściekowe
Efektywność ekonomiczna 0,53	cena planu	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
	koszty inwestycyjne	0,5396	0,1602	0,2479	0,0776	0,1911	0,4834	0,0397	0,0124	0,0306	0,0775
Efektywność procesu 0,33	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
	jakość klinkieru	0,2375	0,1282	0,1155	0,4901	0,1634	0,2310	0,0148	0,0628	0,0209	0,0296
Efektywność ekologiczna 0,14	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
	utyliczacja 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						

Źródło: Opracowanie własne.

6. Podsumowanie

Warunki technologiczne procesu wypalania klinkieru w piecu obrotowym stwarzają duże możliwości wykorzystania paliw alternatywnych z odpadów przemysłowych i komunalnych jako zamiennika paliw kopalnych, nieodnawialnych. Jak wynika z doświadczeń krajowych i zagranicznych, proces współspalania odpadów palnych w piecu obrotowym jest konkurencyjny dla zawodowych spalarni, zarówno pod względem kosztowym, ekologicznym, jak i zdolności masowej. Przedstawiony w artykule sposób wielokryterialnej analizy AHP może być dobrym narzędziem wspomagającym decyzję wyboru konkretnego PA. Uzyskane wyniki z próby wykorzystania modelu AHP do wyboru najlepszego paliwa alternatywnego są zgodne z obowiązującymi tendencjami w przemyśle. Świadczy to o celowości takich analiz, tym bardziej że w materiale chciano tylko przedstawić możliwości AHP i ze względu na ograniczoną objętość artykułu celowo nie rozbudowano tego modelu. Oczywiście rozbudowanie modelu, np. o ocenę liczbową poszczególnych elementów w oparciu o wybraną grupę ekspertów z przemysłu, pozwoli zweryfikować te wyniki i uzyskać dodatkowe informacje, pozwalające na optymalizację procesu współspalania paliw alternatywnych*.

Literatura

- [1] P o h e k a r S.D., R a m a c h a n d r a n M., *Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning – A review*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2004, Vol. 8, s. 365–381.
- [2] *Market opportunities for use of alternative fuels in cement plants across the EU*, CEMBUREAU, May 2016.
- [3] D u d a J., *Energooszczędne i proekologiczne techniki wypalania klinkieru cementowego*, „Prace Instytutu Mineralnych Materiałów Budowlanych” 2004, nr spec.
- [4] D u d a J., K o ł o s o w s k i M., T o m a s i a k J., *System logistyczny w zakładzie segregacji przeróbki odpadów*, „Logistyka” 2015, nr 3, s. 1030–1039.
- [5] S ł a d e c z e k F., *Wymagania dotyczące spalania odpadów w piecach przemysłowych*, „Surowce i Maszyny Budowlane” 2012, nr 11, s. 125–135.
- [6] *Cement Sector. Trends in Beneficial Use of Alternative Fuels and Raw Materials*, U.S. Environmental Protection Agency, Washington 2008.
- [7] H o i d a l e n O., *Liquid organic waste as secondary fuel*, Thermie, Berlin 1992.
- [8] K u r d o w s k i W., *Poradnik technologa przemysłu cementowego*, Arkady, Warszawa 1981.
- [9] L e p u c k i M., *Wpływ warunków współspalania paliw alternatywnych w cementowym piecu obrotowym na energochłonność procesu i emisję dwutlenku węgla*, Politechnika Opolska, Opole 2011, praca doktorska.

* Artykuł sfinansowany został z funduszy uczelni przyznanych na utrzymanie potencjału badawczego kierunku ZIP, temat zadania badawczego pt. Optymalizacja procesów produkcyjnych.

- [10] A d a m u s W., G r ę d a A., *Wspomaganie decyzji wielokryterialnej w rozwiązywaniu wybranych problemów organizacyjnych i menedżerskich*, „Badania Operacyjne i Decyzje” 2005, nr 2, s. 5–36.
- [11] D u d a J., *Termiczne przekształcanie osadów ściekowych*, „Przegląd Komunalny” 2014, nr 6, s. 46–48.
- [12] P r u s a k A., S t e f a n ó w P., *AHP – analityczny proces hierarchiczny. Budowa i analiza modeli decyzyjnych*, C.H. Beck, Warszawa 2014.

JACEK TOMASIAK
MARIUSZ KOŁOSOWSKI
PRZEMYSŁAW MALINOWSKI

MULTI-CRITERIA EVALUATION OF ALTERNATIVE FUELS USED IN THE PROCESS OF BURNING CEMENT CLINKER

Keywords: rotary kiln, alternative fuels, multi-criteria analysis.

Thermal utilization of waste or its degradation is the most effective means of disposal, consistent with sustainable development. As a result, there is still a problem with the exploration of the best ecological and economical waste disposal techniques. The commonly used methods for assessing the suitability of alternative fuels (PA) from waste are mainly to determine the chemical composition of fuels and combustion products as well as the resulting gas and dust emissions. The method that will allow for a much deeper assessment of the suitability of alternative fuels in terms of technology, ecology and economy, may be the multi-criteria evaluation of AHP (Analytical Hierarchy Process). In the article, the example of the cement clinker firing process in the rotary kiln presents the results of the multi-criteria evaluation of the applied PA, which confirm the usefulness of the AHP method in the selection of the fuel that is most favorable for a given technology.