

# EKOINNOWACYJNE TECHNIKI UTYLIZACJI ODPADÓW POWĘGLOWYCH

**Jerzy DUDA, Mariusz KOŁOSOWSKI, Przemysław MALINOWSKI,  
Jacek TOMASIAK**

**Streszczenie:** Odpady powęglowe, ze względu na ich ilość i różnorodność pod względem własności fizyko-chemicznych i wynikające z tego kłopoty z ich zagospodarowaniem, są dużym problemem ekologicznym. W związku z tym, problem utylizacji i ograniczenia wpływu na środowisko hałd przykopalnianych jest ciągle aktualny. W artykule przedstawiono nowe innowacyjne techniki, zgodne z ideą zrównoważonego rozwoju, które w znaczący sposób zagospodarują te odpady. Na przykładzie procesu wypalania klinkieru cementowego przedstawiono oryginalny sposób wykorzystania odpadów powęglowych, które w tym procesie są pełnowartościowym zamiennikiem naturalnych surowców mineralnych i węgla kamiennego.

**Słowa kluczowe:** produkcja cementu, proces wypalania klinkieru, odpady powęglowe, reaktory plazmowe.

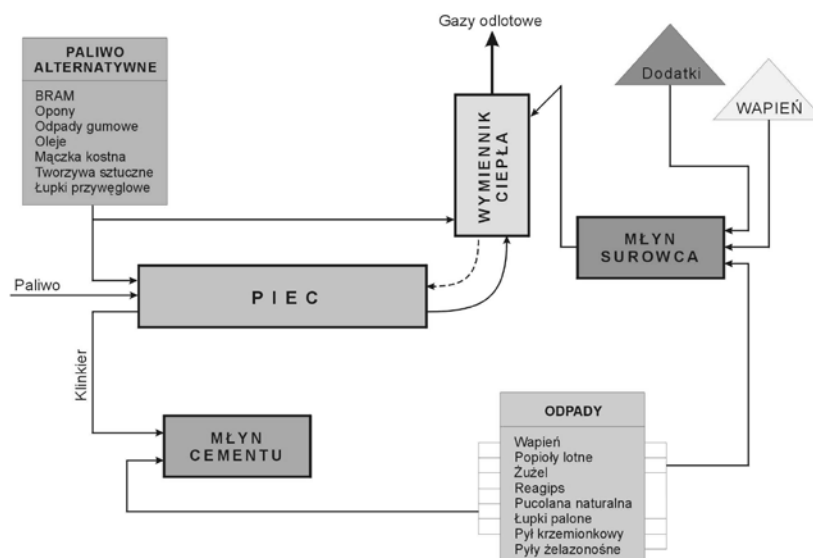
## 1. Wprowadzenie

Przemysł cementowy w Polsce jest przykładem sektora gospodarczego, w którym działalność innowacyjna odgrywa istotną rolę w rozwoju tej branży. Jeszcze w latach 80. ubiegłego wieku przemysł cementowy w Polsce należał do najbardziej energochłonnych i szkodliwych dla środowiska przemysłów w Europie. W porównaniu do krajów byłej 15 UE, energochłonność wytwarzania cementu w Polsce była dwukrotnie wyższa. Podobnie wyglądały emisje szkodliwych gazów i pyłów, które znacznie przekraczały dopuszczalne limity. Wszystko to było wynikiem ponad 50% produkcji cementu energochłonną metodą moką oraz brakiem wysokosprawnych urządzeń odpylających. Pod koniec XX wieku, w polskim przemyśle cementowym obserwuje się intensywny rozwój nowych technik wytwarzania cementu. Działalność ta była wynikiem kryzysu energetycznego (paliwowego), który ze względu na wysoką energochłonność tej branży, spowodował znaczne ograniczenie produkcji cementu. Skutkiem tych działań było praktycznie wyeliminowanie mokrej metody (obecnie udział ten wynosi poniżej 2%) dzięki budowie nowoczesnych zakładów wykorzystujących metodę suchą oraz modernizację istniejących zakładów, zarówno pracujących technologią moką, jak i suchą, które zostały wybudowane pod koniec lat 70. XX wieku. Dzięki tej głębokiej przebudowie przemysłu cementowego w Polsce oraz wdrożeniu nowoczesnych technik wypalania i przemiału cementu, przemysł ten należy dzisiaj do najnowocześniejszych w Europie i na świecie. Praktycznie wszystkie cementownie w Polsce swoimi wskaźnikami techniczno-ekonomicznymi odpowiadają najlepszym technikom i spełniają standardy BREF (BAT Reference Document – najlepsze dostępne techniki niepowodujące nadmiernego wzrostu kosztów, przeciwdziałające lub zmniejszające zanieczyszczenie powietrza). Zarówno jednostkowe zużycie ciepła oraz emisja pyłów odpowiadają najlepszym technikom wytwarzania i najostrzejszym limitom

dopuszczalnych emisji zgodnie z IPCC (Integrated Pollution Prevention Control). Proces działalności innowacyjnej w przemyśle cementowym jest procesem ciągłym, zmienione zostały tylko cele [1]. Dzisiaj priorytetem tej działalności, zgodnie z programem Światowej Rady Biznesu ds. Zrównoważonego Rozwoju, jest wdrażanie nowych technologii, które oprócz zwiększenia efektywności produkcji (zysków ekonomicznych) mają korzystny wpływ na środowisko. Działalność ta jest wynikiem gwałtownego rozwoju technologicznego przemysłu cementowego, który nastąpił pod koniec ubiegłego wieku. Postęp w technologii produkcji cementu, jaki dokonał się w ostatnich latach, spowodował, że przemysł ten nie tylko przestał być uciążliwy dla środowiska, ale dzięki wykorzystaniu w procesie odpadów przemysłowych i komunalnych, może spełniać bardzo pożyteczną rolę w jego ochronie [2].

## 2. Ekoinnowacje w przemyśle cementowym

Proces technologiczny wytwarzania cementu, a zwłaszcza wysokotemperaturowy proces wypalania klinkieru cementowego, stwarzają duże możliwości zagospodarowania odpadów przemysłowych jako substytutu surowców naturalnych, paliwa i klinkieru w cemencie. Na rys. 1 przedstawiono możliwości wykorzystania odpadów przemysłowych i komunalnych w technologii produkcji cementu.



Rys. 1. Możliwości wykorzystania surowców odpadowych w procesie produkcji cementu (opracowanie własne)

Proces technologiczny produkcji cementu należy do technologii bezodpadowej, a dzięki naturalnym warunkom technologicznym może spełniać ważną rolę w utylizacji szkodliwych dla środowiska odpadów. W ostatnich latach przemysł cementowy aktywnie włączył się do rozwiązywania problemu utylizacji odpadów z innych gałęzi przemysłu. Zainteresowanie problematyką wykorzystania odpadów wynika z jednej strony z dążenia do obniżenia kosztów produkcji, a z drugiej strony z występującego już braku lub złej

jakości surowców naturalnych, zwłaszcza margli. Ważnym argumentem przemawiającym za włączeniem się przemysłu cementowego do problemu utylizacji odpadów jest dążenie do zmiany ciągle jeszcze panującego w społeczeństwie wizerunku cementowni jako zakładu szkodliwego dla środowiska naturalnego. Korzyści dla środowiska ze stosowania odpadów w procesie produkcji cementu to m.in.:

- ograniczenie degradacji terenów rolniczych (zmniejszenie wydobycia surowców naturalnych i węgla),
- całkowite wykorzystanie niepalnych części odpadów (wyeliminowanie składowania produktów spalania – żużli, popiołu),
- zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych.

Powszechnie stosowanymi w przemyśle cementowym odpadami są: popioły lotne z energetyki, żużel wielkopieczowy, pył krzemionkowy czy gips z odsiarczania spalin. Nową, szczególnie w ostatnich latach, działalnością innowacyjną, jest ograniczenie zużycia węgla w procesie wypalania klinkieru. Warunki technologiczne, jakie panują w piecu obrotowym (wysoka temperatura i alkaliczna atmosfera) oraz możliwość dozowania paliwa o różnej postaci fizycznej, pozwalają na stosowanie w tym procesie różnych odpadów palnych. Piec obrotowy jest urządzeniem, w którym przy stosunkowo niskich nakładach można utylizować wiele odpadów trudnych do wykorzystania w innych technologiach. Jest nie tylko doskonałym urządzeniem do spalania paliw z odpadów, ale również spełnia praktycznie wszystkie teoretyczne wymagania stawiane przy spalaniu odpadów niebezpiecznych, zawierających PCB (polichlorowane bifenyle). W ostatnich latach, po licznych spotkaniach ze społecznością lokalną i akcjach edukacyjnych dotyczących bezpiecznego dla środowiska wykorzystania w procesie wypalania klinkieru paliw z odpadów, nastąpił znaczący wzrost ich zużycia. Aktualnie, w przemyśle cementowym w Polsce, paliwa z odpadów zabezpieczają już ponad 50% ciepła w procesie wypalania klinkieru. Korzyści środowiskowe oraz ekonomiczne w cementowni, wynikające ze stosowania paliw i surowców z odpadów powodują, że poszukuje się ciągle nowych, innowacyjnych technik ich wykorzystania. Jednym z odpadów, który spełnia rolę zarówno zamiennika paliwa, jak i surowca, są łupki przywęglowe – odpady powęglowe [3].

### **3. Metody zagospodarowania odpadów powęglowych**

Odpady powęglowe – łupki przywęglowe – są odpadem powstającym przy wydobyciu węgla. Wraz z wydobyciem węgla następuje wzrost ilości odpadów przywęglowych, często zawierających jeszcze znaczną ilość rozproszonego węgla (ok. 10-15%), które wymagają składowania na hałdach przykopalnianych. Składowane odpady przywęglowe, oprócz tego, że wymagają znacznych terenów, stwarzają duże zagrożenie dla środowiska (wydzielanie szkodliwych gazów SO<sub>2</sub>, CO), w wyniku samozapłonu hałd. W związku z tym, poszukuje się technologii, które pozwolą na zagospodarowanie tych odpadów. Nie jest to zadanie łatwe, głównie ze względu na znaczne różnice składu (zawartości węgla) oraz wysokie koszty eksploatacji hałd. Teoretycznie istnieje wiele rozwiązań dotyczących zagospodarowania odpadów powęglowych. Od najprostszych, polegających na wykorzystaniu w podszaszaniu wyrobisk eksploatacyjnych, do odzysku węgla z odpadów. Jak wynika z przeprowadzonej wielokryterialnej oceny sposobów zagospodarowania odpadów pochodzących z górnictwa węgla kamiennego, metodą AHP (Analytic Hierarchy Process), przez zespół specjalistów z zakresu górnictwa, przeróbki surowców, inżynierii środowiska i gospodarki odpadami, nie jest to zadanie łatwe. Ze względu na złożoność problemu, nie można było wytypować jednego, najlepszego rozwiązania. Jak wynika z tej

oceny, która dotyczyła 24 innowacyjnych technologii, zalecanymi sposobami zagospodarowania tych odpadów są [4]:

- zagospodarowanie odpadów przeróbczych do rekultywacji technicznej terenów zdegradowanych,
- zagospodarowanie skały płonnej do likwidacji pustek po eksploatacji resztek pokładów,
- zagospodarowanie odpadów flotacyjnych w posadzce samo zestalającej,
- zagospodarowanie skały płonnej jako materiału w technologii zawieszinowej,
- produkcja kruszyw z odpadów pozyskiwanych z hałdy oraz instalacji przeróbczej,
- pozyskiwanie węgla z odpadów drobnoziarnistych i poflotacyjnych zdeponowanych w stawach osadczych.

W ocenie tej nie uwzględniono wdrożonej, oryginalnej technologii, która z powodzeniem została uruchomiona w jednej z cementowni w kraju. Na przykładzie wykorzystania odpadów powęglowych w technologii produkcji cementu, przedstawiono działalność innowacyjną od pomysłu do realizacji i rozwoju technologii w czasie wdrożenia.

#### **4. Sposób wykorzystania odpadów powęglowych w cementowni**

Jednym z ważniejszych zadań w programie modernizacji przemysłu cementowego w Polsce było zlikwidowanie energochłonnej metody mokrej wypalania klinkieru cementowego. Zadanie to sprowadzało się głównie do wzrostu wydajności cementowni pracujących metodą suchą, poprzez budowę nowych linii produkcyjnych lub modernizację istniejących zakładów pracujących metodą suchą. Uzyskany wzrost wydajności klinkieru metodą suchą pozwolił zlikwidować lub wyłączyć z produkcji (zimna rezerwa) stare, nienadające się już do modernizacji zakłady. Problemem, zarówno gospodarczym, jak i społecznym, były stosunkowo młode zakłady, pracujące metodą mokrą, uruchomione pod koniec lat 70. ubiegłego wieku (cem. Warta II i Strzelce Opolskie). W związku z tym, w programie modernizacji krajowego przemysłu cementowego, zakłady te zostały zakwalifikowane do modernizacji. Ze względu na znaczne zróżnicowanie pod względem zamaszynowania oraz własności fizyko-chemicznych stosowanych surowców w poszczególnych zakładach, każda cementownia wymagała indywidualnego rozwiązania. Aby ułatwić wybór wariantu modernizacji, opracowany został specjalny algorytm, który pozwalał na wybór technologii modernizacji wybranej cementowni oraz określić realność przedsięwzięcia i przybliżone koszty realizacji. W oparciu o ten algorytm zmodernizowanych zostało 7 linii piecowych (5 pracujących metodą suchą i 2 piece metody mokrej), co pozwoliło na wyeliminowanie z produkcji 14 starych pieców na metodę mokrą [5].

Ze względu na zakres modernizacji oraz oryginalność rozwiązania, w artykule przedstawiono sposób modernizacji metody mokrej na metodę suchą. Do realizacji wstępnie wytypowano dwie cementownie – Warta II i Strzelce Opolskie. Były to bliźniacze cementownie wybudowane w latach 70. XX w. z dostaw byłego ZSRR. Wspólnym utrudnieniem przy wyborze wariantu modernizacji w tych cementowniach, był brak tzw. surowca niskiego, który jest jednym z podstawowych składników nadawy piecowej. Ze względu na małe zainteresowanie nową technologią suchą cementowni Strzelce Opolskie, postanowiono ograniczyć się tylko do cementowni Warta II. Za takim podejściem, oprócz względów technicznych, przemawiały również względy społeczne. Cementownia na tym terenie (Działoszyn) jest praktycznie jedynym, większym miejscem pracy poza rolnictwem.

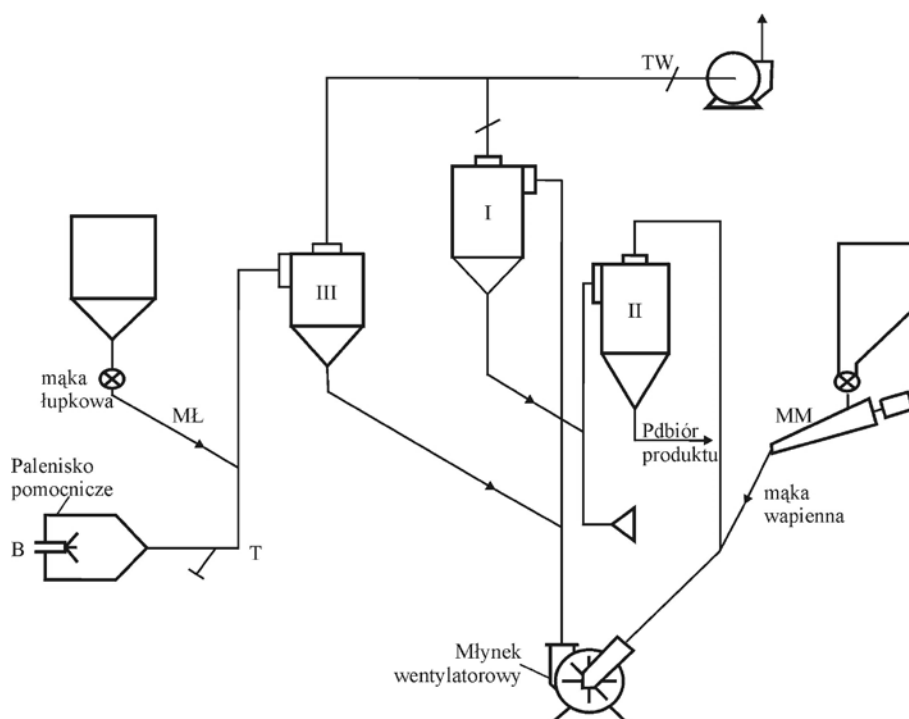
Pozostawienie zakładu bez zmiany technologii skutkowałoby, ze względu na jego wysoką energochłonność i szkodliwe oddziaływanie na środowisko, ograniczeniem produkcji lub całkowitą likwidacją, podobnie jak spotkało to cementownię Strzelce Opolskie, która została fizycznie zlikwidowana.

W cementowni Warta II nie można było zastosować typowego rozwiązania, bo oprócz wysokiej wilgotności surowca wapiennego (tzw. wysokiego), cementownia nie posiadała własnego surowca (niskiego). Sprowadzany wcześniej do cementowni surowiec – łupek łęczycki, był już praktycznie niedostępny (likwidacja kopalni). W związku z tym, oprócz modernizacji linii technologicznej, wymagane było otwarcie nowej kopalni surowca, znacznie oddalonej (ok. 40km od cementowni), co znacznie zwiększało koszty tej inwestycji. Realizacja modernizacji w tych warunkach była nieopłacalna. W związku z tym, wbrew opinii specjalistów z zakresu wytwarzania cementu, postanowiono nową technologię wypalania klinkieru w cementowni Warta II oprzeć na odpadach powęglowych, które kopalnie węgla kamiennego oferowały za symboliczną opłatę (loco cementownia). Odpady powęglowe, podobnie jak inne surowce odpadowe, były już wcześniej stosowane w przemyśle cementowym. Ze względu jednak na zawartość rozproszonego węgla w tych odpadach, który stanowił duże trudności technologiczne (znaczny wzrost emisji pyłów) i zagrożenia dla bezpieczeństwa pracy (wybuchy w urządzeniach odpylających), zrezygnowano z ich stosowania. Z jednej strony konieczność likwidacji metody mokrej i brak surowca niskiego, a z drugiej strony korzystny pod względem mineralogicznym skład chemiczny powstałego popiołu z odpadów powęglowych po spaleniu spowodował, że wbrew negatywnym opiniom technologów produkcji cementu, poszukiwano sposobu ich wykorzystania w modernizowanej linii wypalania klinkieru. W cementowni Warta II odpady powęglowe w pierwszej kolejności wykorzystano jako źródła ciepła w procesie wypalania (paliwo w reaktorze – kalcynatorze), a dopiero powstały popiół – jako zamiennik surowca niskiego. Mieszanina powstałego popiołu i gorącej mąki wapiennej przed wprowadzeniem do pieca miesza się w ostatnim stopniu wymiennika cyklonowego ciepła. Opracowanie koncepcji nowego sposobu wypalania, poprzedzone zostało szeregiem badań wstępnych na stanowisku badawczym w skali 1,4 technicznej. W tabeli 1 przedstawiono surowce, które zostały wykorzystane w tych badaniach [3].

Tab. 1. Skład chemiczny surowców

| Składnik                       | Mąka wapienna zawartość w % | Mąka łupkowa zawartość w % |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Strata prażenia                | 35,4                        | 71,4 (popiół)              |
| SiO <sub>2</sub>               | 13,7                        | 56,7                       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,7                         | 27,3                       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,2                         | 6,1                        |
| CaO                            | 42,4                        | 2,2                        |
| MgO                            | 1,5                         | 1,9                        |
| SO <sub>3</sub>                | 0,4                         |                            |

Na rys. 2 przedstawiono schematycznie opracowane stanowisko badawcze. Celem tych badań było sprawdzenie wypalania odpadów w warunkach technologicznych wynikających z pracy reaktora zabudowanego w zewnętrznym cyklonowym wymienniku ciepła pieca obrotowego oraz sprawdzenie stopnia wymieszania tych surowców.



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego spalania łupka w skali ¼ technicznej (opracowanie własne)

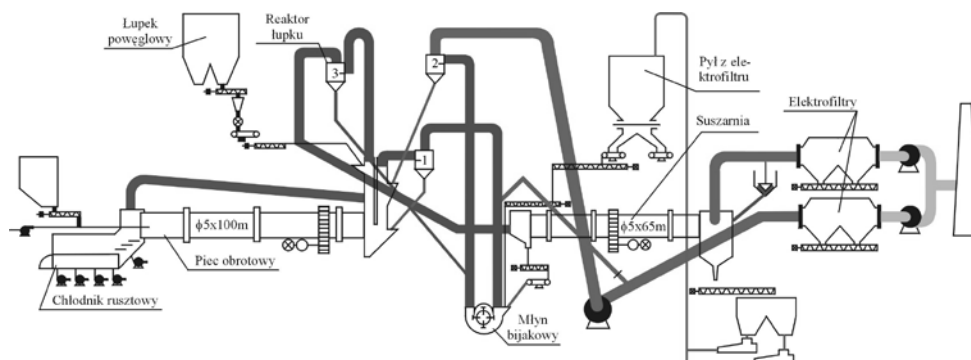
Wyniki prób technologicznych na stanowisku badawczym przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Skład chemiczny powstałej mieszaniny

| Składnik                       | Zawartość [%] | Średnie odchylenie kwadratowe | Przedział ufności |        | Odchylenie (+/-) |
|--------------------------------|---------------|-------------------------------|-------------------|--------|------------------|
|                                |               |                               | od                | do     |                  |
| SiO <sub>2</sub>               | 13,030        | 0,053                         | 12,977            | 13,083 | 0,053            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,204         | 0,029                         | 3,175             | 3,233  | 0,029            |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,666         | 0,020                         | 1,646             | 1,686  | 0,020            |
| CaO                            | 42,630        | 0,097                         | 42,533            | 42,727 | 0,097            |
| MgO                            | 0,560         | 0,000                         | 0,560             | 0,560  | 0,000            |
| SO <sub>3</sub>                | 0,317         | 0,007                         | 0,310             | 0,324  | 0,007            |

Uzyskane wyniki prób wypalania odpadów i wymieszania obu surowców potwierdziły możliwość ich wykorzystania w nowej technologii. Nie bez znaczenia przy opracowaniu tej nowej, oryginalnej metody wypalania klinkieru cementowego, były wcześniejsze prace badawcze dotyczące produkcji spoiwa hydraulicznego na bazie odpadów powęglowych w reaktorze plazmowym. W pracach tych, oprócz inwentaryzacji odpadów kopalnianych oraz określenia ich składu chemicznego i wartości opałowej, wykonano szereg badań dotyczących kinetyki ich spalania. Opracowana koncepcja modernizacji pieca na metodę suchą, w której odpady powęglowe stanowią substytut zarówno części paliwa – węgla

w kalcynatorze oraz tzw. surowca niskiego, okazała się bardzo interesującym rozwiązaniem o wysokiej efektywności ekonomicznej i technicznej. Ze względu jednak na wysokie koszty tej inwestycji, cementownia nie była w stanie jej sfinansować. Ponad 50% kosztów inwestycji stanowiły koszty budowy nowego działu przygotowania surowca (młyn susząco-mielący i zbiorniki homogenizacyjne) w postaci suchej mączki. Zarówno zaangażowanie kierownictwa cementowni, jak i obiecujące wyniki badań wstępnych spowodowały, że temat modernizacji był ciągle aktualny. Wynikiem dalszych poszukiwań rozwiązania dla cementowni było opracowanie oryginalnej, jedynej na świecie wdrożonej technologii półsuchej. Aby wyeliminować wysokie koszty przygotowania surowca w postaci suchej mączki wapiennej, postanowiono surowiec ten przygotować w postaci szlamu wapiennego w istniejących młynach, natomiast drugi surowiec – odpady powęglowe – przygotować w postaci suchej mączki łupkowej. Dzięki przemiałowi na mokro tylko surowca „wysokiego” – kamienia wapiennego – można było obniżyć zawartość wody (z 38-40%) do 27%, przy tej samej płynności szlamu. W nowej technologii półsuchej odpady powęglowe (sucha mączka łupkowa) stanowią około 13% surowca (nadawy do pieca), stąd całkowita zawartość wody w nadawie piecowej została pośrednio obniżona do poziomu 12%. Uwzględniając, że każdy 1% wody w nadawie piecowej zwiększa dodatkowo zużycie ciepła w procesie wypalania o około 80-100 kJ/kgkl. Pośrednie obniżenie zawartości wody w nadawie pozwoliło obniżyć zużycia ciepła o około 1100 kJ/kgkl. Nie bez znaczenia w tej technologii jest efekt energetyczny wynikający ze spalania pozostałości węglowej w odpadach, który przy 13% udziale odpadów wynosi około 1000 kJ/kgkl. Na rys. 3 przedstawiono opracowany i wdrożony tzw. wariant przejściowy – metoda półsucha, który uwzględnia już przyszłą modernizację na metodę suchą. Znaczna część urządzeń została w tym wariantcie wykonana z myślą o docelowym rozwiązaniu – przebudowa na metodę suchą [6].



Rys. 3. Schemat technologiczny innowacyjnej metody półsuchej (opracowanie własne)

Modernizacja istniejącego pieca obrotowego o wymiarach  $\phi 5 \times 185$  m, polegała na usunięciu ok. 20 m środkowej części walczaka pieca i postawienie w tym miejscu wymiennika cyklonowego 2-stopniowego i reaktora łupku – kalcynatora. Dolna część wraz z chłodnikiem stanowi piec o wymiarach  $\phi 5 \times 100$  m, natomiast górna, po wyposażeniu w napęd, stanowi suszarnię obrotową  $\phi 5 \times 65$  m. Szlam wapienny przed wprowadzeniem do pieca jest wstępnie suszony w suszarni obrotowej mieszaniną gazów powstałych ze spalania mąki łupkowej w reaktorze 3 i części gazów odlotowych z pieca. Następnie

powstałe w suszarni granule o zawartości jeszcze około 7-10% wody wprowadzone zostają do młyna wentylatorowego. W młynie wentylatorowym zabudowanym pomiędzy 1 i 2 stopniem wymiennika cyklonowego następuje końcowe suszenie i rozdrobnienie powstałych granul. Uzyskana w młynie sucha mąka wapienna miesza się z popiołem powstałym po spaleniu mąki łupkowej w reaktorze 3. Tak powstała mieszanina surowcowa – nadawa piecowa, przed wprowadzeniem do pieca obrotowego poddana zostaje dalszej homogenizacji w wymienniku cyklonowym. Uzyskane po modernizacji wyniki z eksploatacji tego pieca potwierdziły przyjęte założenia i korzyści z wykorzystania odpadów powęglowych. W roku 2004 cementownia Warta II przeprowadziła modernizację docelową na metodę suchą. Jak wynika z danych statystycznych cementowni, nowa technologia wypalania pozwoliła zutilizować już ponad 3,5 mln Mg odpadów powęglowych. Jest to przykład działania zgodnie z zasadą zrównoważonego rozwoju. Oprócz efektów ekologicznych, wynikających z likwidacji hałd przykopalnianych, technologia ta pozwala na ograniczenie zużycia naturalnych nieodnawialnych surowców i paliw.

## **5. Nowe przyszłościowe techniki zagospodarowania odpadów powęglowych**

Wzrost ilości odpadów powęglowych powoduje, że problem ich zagospodarowania jest ciągle aktualny. Dotyczy to zarówno nowo powstałych odpadów z bieżącego wydobycia węgla lub przeróbki, jak również odpadów zalegających na hałdach kopalnianych. Obserwowany na świecie rozwój nowych metod wypalania w reaktorach statycznych, spoiw o własnościach hydraulicznych, które mogą być substytutem tradycyjnego klinkieru cementowego spowodował, że technologia ta stała się również rozwijana w Polsce. Prace te ukierunkowane są na instalacje małe, mobilne, o wydajności rzędu kilku Mg/h, które charakteryzują się niskimi kosztami inwestycyjnymi i mogą być wykorzystane w miejscu wytwarzania odpadów.

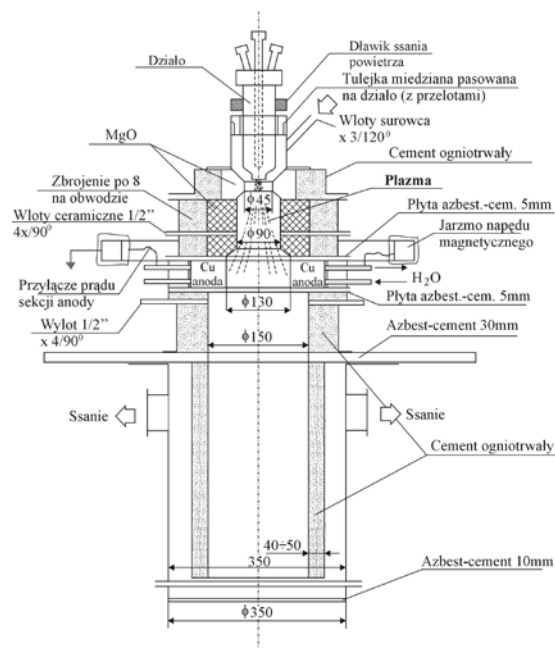
Już w latach 80. prowadzone były próby produkcji klinkieru belitowego o niższym module nasycenia w reaktorze ze złożem fluidalnym. Podobne prace badawcze dotyczące wypalania w reaktorach statycznych prowadzone były w Polsce. Pierwsze próby wypalania klinkieru w reaktorze statycznym – piecu cyklonowym były prowadzone w Instytucie Mineralnych Materiałów Budowlanych, już w latach 70. Okazało się wówczas, że wysoka temperatura wypalania, jaką można uzyskać w piecu cyklonowym, nie jest wystarczającym czynnikiem do powstania minerałów klinkierowych.

Rozwój innowacyjnych technologii plazmowych i uzyskane wyniki z prób wypalania klinkieru oraz własne doświadczenia z wypalania w piecu cyklonowym spowodowały, że w Instytucie MMB podjęto prace badawcze nad wykorzystaniem plazmy w procesie technologicznym produkcji materiałów wiążących. W roku 1973 Glasser przeprowadził próbę wypalania materiałów hydraulicznych w reaktorze plazmowym niskotemperaturowym o mocy 40 kW [7]. Mieszaninę surowcową, która zestawiona została w stosunku stechiometrycznym, umożliwiającym powstanie minerałów klinkierowych, wykonał ze zmielonych odpadów marmurowych i piasku. Uzyskane wówczas wyniki potwierdziły możliwość wykorzystania plazmy do produkcji spoiw hydraulicznych o własnościach zbliżonych do klinkieru cementowego.

Podobne próby przeprowadził J. Tylko, który w reaktorze typu EPR (Expanded Precessive Plasma – reaktor poszerzonej plazmy) o mocy 250 kW uzyskał również spiek zawierający typowe minerały klinkieru cementowego [8]. Klinkier-spiek otrzymywany w plazmie, w stosunku do tradycyjnego klinkieru wypalanego w piecu obrotowym, posiadał



większą ilość fazy szklistej oraz zwiększoną ilość  $C_3S$  – alitu (krzemianu trójwapieniowego). W latach 80. wybudowano w IMMB dwa reaktory plazmowe: jeden typu EPR o mocy 250 kW (wg koncepcji otrzymanej od J. Tylko) oraz drugi, mniejszy, o mocy 50 kW, typu SPR (Selfcommutating Plasma Reaktor). Reaktory zasilano nadawą surowca od kilku do kilkudziesięciu kg/h. Jako surowiec zastosował mieszaninę kamienia wapiennego i odpadów powęglowych zawierających jeszcze około 10% rozproszonego węgla. Wprowadzenie węgla do mieszaniny miało na celu zwiększenie podatności surowca na szybkie utlenianie w strumieniu plazmy oraz rozproszenie materiału, co przyspieszyło jego reakcję z  $CaO$  i tworzenie się minerałów klinkierowych. Zarówno próby wypalania klinkieru w reaktorze EPR jak i SPR, w którym w miejsce mechanicznej rotacji plazmy zastosowano magnetyczną, nie potwierdziły wcześniejszych wyników uzyskanych przez Glassera i Tylkę. W reaktorze SPR do poszerzenia plazmy (rotacji) wykorzystano zasadę komutatorowego silnika prądu stałego z plazmowym rotorem, komutatorową anodą pierścieniową podzieloną na segmenty oraz statorem, którego sekwencjonowane uzwojenia połączone są z anodą. Schemat tego reaktora przedstawiono na rys. 4 [9].

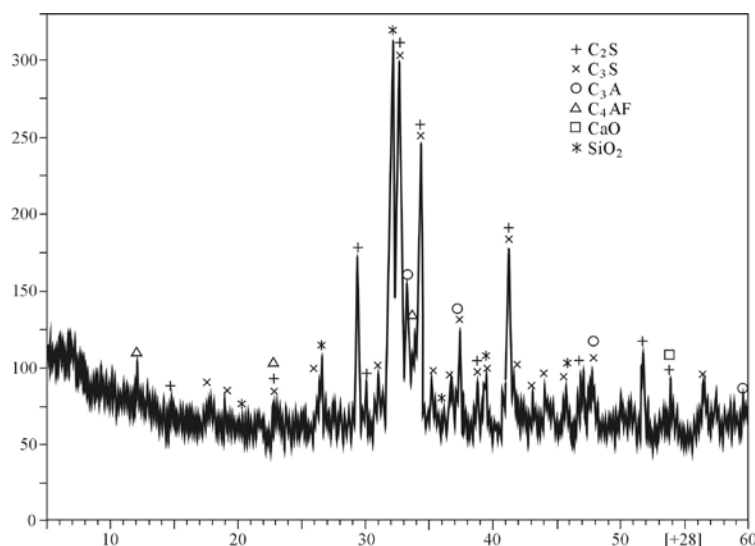


Rys. 4. Schemat reaktora SPR (opracowanie własne)

Wyniki prób wypalania w reaktorze plazmowym były podobne do prób wypalania w piecu cyklonowym. Wadą obu technologii był krótki czas przebywania materiału w wysokiej temperaturze. Z przeprowadzonej oceny wypalania w plazmie stwierdzono również błędy technologiczne tej metody, wynikające między innymi ze współprądowego charakteru wymiany ciepła, wynikiem czego niskotemperaturowe procesy endotermiczne rozkładu węglanów przebiegają w najwyższych temperaturach plazmy (ok. 8000 K), co powoduje spieczenie powierzchni ziaren nadawy i wstrzymanie procesu dekarbonizacji.

W związku z tym, postanowiono wyeliminować ten proces z reaktora plazmowego. O słuszności tej decyzji świadczy próba wypalania materiału wstępnie

zdekarbonizowanego. Próbę tę przeprowadzono na mące pobranej po 4. stopniu wymiennika cyklonowego z pieca w cementowni Górażdże. Na rys. 5 przedstawiono dyfraktogram uzyskany z materiału wstępnie zdekarbonizowanego, wypalonego w reaktorze plazmowym typu SPR.



Rys. 5. Dyfraktogram materiału po wypaleniu w plazmie próbki materiału wstępnie zdekarbonizowanego (po 4-tym stopniu wymiennika)

Uzyskane fazy klinkierowe potwierdziły możliwość wykorzystania techniki plazmowej w technologii produkcji spoiw o własnościach podobnych do klinkieru cementowego, z surowców odpadowych z udziałem odpadów powęglowych.

## 6. Podsumowanie

Technologia produkcji cementu stwarza warunki bezodpadowej utylizacji odpadów przemysłowych i komunalnych. Cementownie, ze względu na wielkotonażową produkcję oraz duże możliwości wykorzystania odpadów jako zamiennika części surowca i paliwa w procesie wytwarzania cementu, są istotnym partnerem w bezpiecznej utylizacji odpadów produkcyjnych z innych przemysłów. Opracowana i wdrożona oryginalna metoda wykorzystania w procesie wypalania klinkieru odpadów powęglowych pozwoliła na znaczne zagospodarowanie szkodliwych dla środowiska odpadów. Proces, który jeszcze niedawno należał do technologii szkodliwych dla środowiska, obecnie, w wyniku głębokiej modernizacji i wdrożeniu nowych innowacyjnych rozwiązań, nie tylko przestał być uciążliwy, ale spełnia bardzo ważną rolę w utylizacji uciążliwych odpadów dla środowiska.

## Literatura

1. Tomasiak J.: Innowacyjne techniki w przemyśle cementowym. Prace Naukowe WSZiP, t. 36, „Współczesne instrumenty innowacji”, Wydawnictwo WSZiP, Wałbrzych, 2015, s. 491-505.

2. Duda J., Kołosowski M., Tomasiak J.: Ekologiczne i technologiczne uwarunkowania działalności innowacyjnej w przemyśle materiałów budowlanych. (Zeszyt Naukowy Modern Management Review – w druku).
3. Duda J.: Energooszczędne i proekologiczne techniki wypalania klinkieru cementowego. Prace IMMB, Opole, 2004.
4. Lutyński A., Blaschke W., Baic I., Wikowska-Kita B.: Analiza innowacyjności technologii zagospodarowania odpadów z górnictwa węgla kamiennego. Górnictwo i Geologia, 2011, t. 6, zeszyt 2, s.109-120.
5. Duda J.: Przyszłościowe ekotechnologie wytwarzania cementu i wapna. Warstwy, 2/1999, s. 146-148.
6. Duda J.: The use of coal spoil in the process of cement production. Thermal Solid Waste Utilization in Regular and Industrial Facilities. Kluwer Academic, New York, 2000, s. 66-77.
7. Glasser F.P.: Production and Properties of Some Cements Made by Plasma Fusion. Cement and Concrete Research, 1975, Vol. 5, s. 55-61.
8. Tylko J.K.: Sposób wytwarzanie hydraulicznych cementów i cementopodobnych materiałów. Patent USA, Nr 4152169, 1979.
9. Duda. J.: Wykorzystanie techniki plazmowej do produkcji spoiw wiążących. Materiały Sympozjum Naukowego "Gospodarka mineralnymi surowcami odpadowymi z górnictwa i energetyki", Kraków, 1996, s. 7-10.

Dr hab. inż. Jerzy DUDA, prof. PWSZ w Nysie

Dr inż. Mariusz KOŁOSOWSKI

Dr inż. Przemysław MALINOWSKI, prof. PWSZ w Nysie

Mgr inż. Jacek TOMASIAK

Instytut Nauk Technicznych

Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nysie

48-300 Nysa, ul. Armii Krajowej 7

tel.: (0-77) 409 11 55

e-mail: jerzy.duda@pwsz.nysa.pl

mariusz.kolosowski@pwsz.nysa.pl

przemyslaw.malinowski@pwsz.nysa.pl

jacek.tomasiak@pwsz.nysa.pl