

# REDUKCJA EMISJI CO<sub>2</sub> W PROCESIE PRODUKCJI CEMENTU

Jerzy DUDA, Jacek TOMASIAK

**Streszczenie:** Produkcja cementu ze względu na wysokotemperaturowy proces wypalania klinkieru należy do przemysłów szczególnie uciążliwych dla środowiska. Dotyczy to zwłaszcza emisji dwutlenku węgla, która jest sumą emisji ze spalania paliwa oraz emisji wynikającej z procesu technologicznego. W artykule omówiono problem emisji CO<sub>2</sub> w procesie produkcji cementu oraz metody jej redukcji. Ze względu na ograniczone już technologiczne możliwości redukcji, jedynym sposobem wypełnienia dopuszczonych limitów emisji może być zastosowanie metody CCS, polegającej na wychwytywaniu i składowaniu dwutlenku węgla.

**Słowa kluczowe:** dwutlenek węgla, produkcja cementu, proces wypalania klinkieru, redukcja CO<sub>2</sub>, metoda CCS.

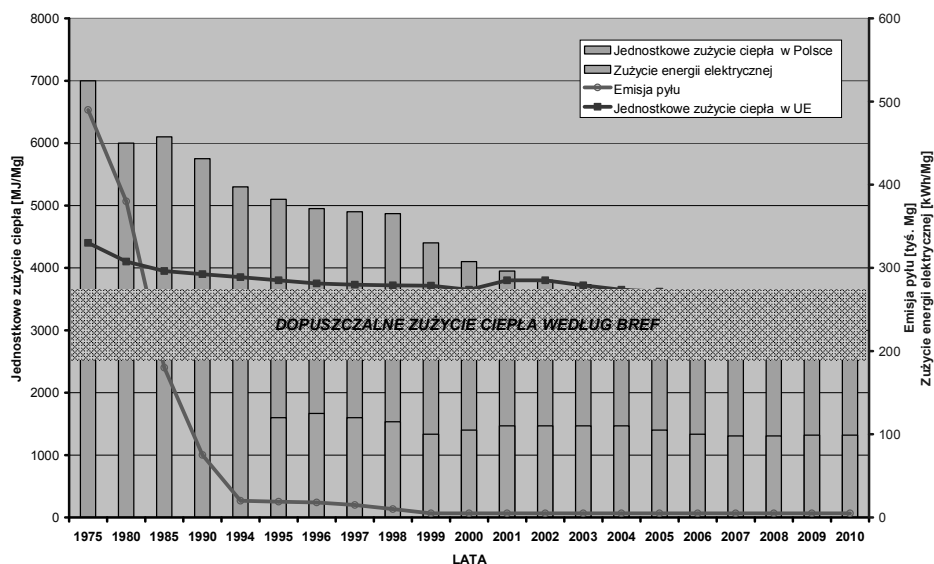
## 1. Wprowadzenie

Produkcja cementu, podobnie jak produkcja energii elektrycznej, należy do procesów, które mają szkodliwy wpływ na środowisko. Wynika to głównie z energochłonności i masowego charakteru produkcji, co powoduje, że przemysł cementowy zużywa znaczne ilości paliw i surowców kopalnych – nieodnawialnych. W związku z tym, zagadnienie obniżenia energochłonności wytwarzania cementu i obniżenie zużycia paliw i surowców nieodnawialnych - kopalnych jest ciągle aktualne. Procesem, który poddawany jest najczęściej różnego rodzaju usprawnieniom w celu ograniczenia energochłonności i szkodliwego oddziaływania na środowisko, jest proces wypalania klinkieru w piecu obrotowym.

Modernizacja przemysłu cementowego, jaka została przeprowadzona w ostatnich latach w Polsce, polegająca m.in. na zastosowaniu nowoczesnych technik wypalania w krótkich piecach z wielostopniowymi cyklonowymi wymiennikami ciepła i układami wstępnej dekarbonizacji, pozwoliła na znaczne wykorzystanie w procesie paliw alternatywnych z odpadów komunalnych i przemysłowych. Wynikiem tych działań, oprócz obniżenia energochłonności, było znaczne zmniejszenie udziału w procesie tradycyjnego paliwa technologicznego – węgla, kosztem zużycia paliw alternatywnych ze znacznym udziałem biomasy. Spowodowało to istotne obniżenie emisji szkodliwych gazów, zwłaszcza dwutlenku węgla. Obniżenie energochłonności procesu wytwarzania cementu oraz ograniczenie zużycia węgla kosztem wykorzystania paliw alternatywnych z odpadów przemysłowych i komunalnych to działania zgodne z pakietem klimatyczno-energetycznym 3x20, który zakłada uzyskanie w roku 2020:

- ograniczenie energochłonności o 20% w stosunku do roku 1990,
- zwiększenie do 20% udział odnawialnych źródeł energii (OZE) w wytwarzaniu energii pierwotnej (Polska została zobowiązana do 15% udziału),
- ograniczenie o 20% emisję gazów cieplarnianych (CO<sub>2</sub>).

Korzystny wpływ tych zmian technologicznych na podstawowe wskaźniki przemysłu cementowego w Polsce przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Wpływ modernizacji przemysłu cementowego na zużycie ciepła i emisję pyłową

Problemem, który wymaga jeszcze rozwiązania zwłaszcza ze względu na zapowiedziane nowe, znacznie niższe limity dopuszczalnych emisji gazów cieplarnianych, jest konieczność dalszej redukcji dwutlenku węgla. Zgodnie z nowymi założeniami Komisji Europejskiej opublikowanymi w roku 2013 w Zielonej Księdze, zakłada się zmianę obowiązującego do roku 2020 pakietu 3x20. W nowej propozycji dotyczącej polityki klimatyczno-energetycznej do roku 2030, Komisja Europejska ogranicza pakiet do dwóch celów: redukcji emisji gazów cieplarnianych o 40% oraz wzrostu do 27% udziału OZE w końcowym zużyciu energii. Są to cele trudne do zrealizowania przez przemysł cementowy, zwłaszcza dotyczące redukcji CO<sub>2</sub>, ponieważ praktycznie wszystkie rezerwy technologiczne i energetyczne zostały już wykorzystane. Wymagać to będzie innego podejścia do problemu redukcji gazów cieplarnianych [1].

Oprócz poszukiwania innych metod technologicznego ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> oraz poprawę efektywności energetycznej, co jest najtańszym sposobem redukcji gazów cieplarnianych, należy podobnie jak energetyka zawodowa uwzględniać nowe - wtórne metody, jak np. CCS (ang. Carbon Capture and Storage), które polegają na wychwytywaniu i składowaniu dwutlenku węgla lub CCU (ang. Carbon Capture and Utility)-wychwytywaniu i wykorzystaniu [2].

## 2. Emisja CO<sub>2</sub> w procesie wytwarzania cementu

Bezpośrednim źródłem emisji dwutlenku węgla w procesie produkcji cementu jest proces wypalania klinkieru cementowego w piecu obrotowym. Dwutlenek węgla występujący w gazach odlotowych z pieca, pochodzi ze spalania paliwa ( $CO_2^P$  - paliwowe) oraz z rozkładu węglanów z surowca ( $CO_2^S$  - surowcowe).

$$\sum CO_2 = CO_2^P + CO_2^S \quad (1)$$

$$CO_2^S = 0,78 CaO^S + 1,09MgO^S \quad (2)$$

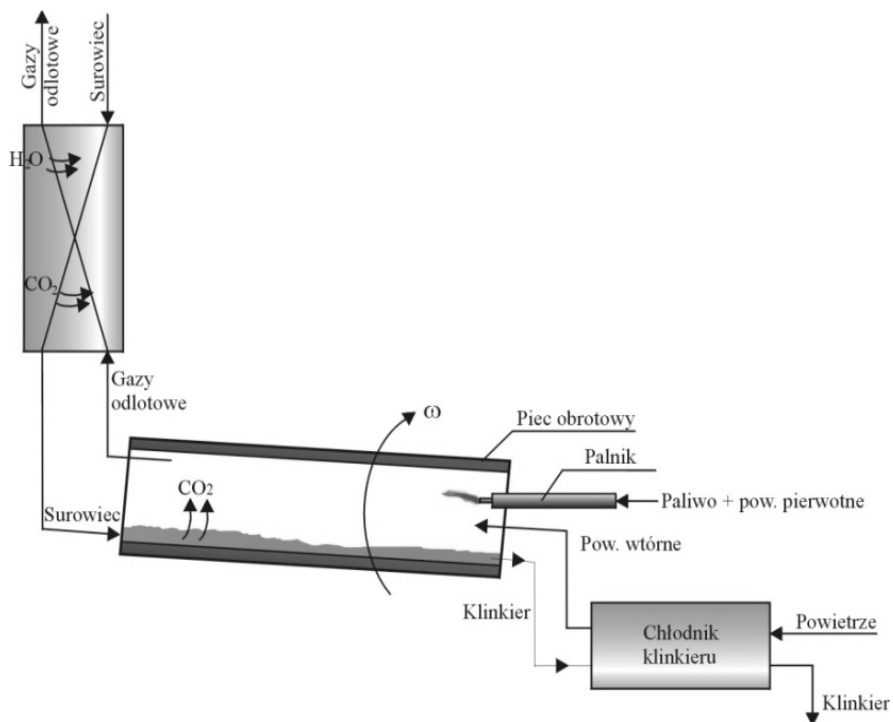
Uwzględniając wskaźnik zużycia surowca na 1kg klinkieru, ilość powstałego dwutlenku węgla z surowca wynosi:

$$G_{CO_2}^S = \frac{G_S \times CO_2^S}{100} \text{ [kg CO}_2\text{/kg kl.]} \quad (3)$$

gdzie:  $CaO^S$  i  $MgO^S$  – zawartość tlenków wapnia i magnezu w nadawie piecowej w % wagowych,

$G_S$  – wskaźnik zużycia surowca na 1 kg klinkieru.

Schemat technologiczny procesu wypalania klinkieru w piecu obrotowym przedstawiono na rys.2.



Rys.2. Schemat technologiczny procesu wypalania klinkieru

Zasadniczy wpływ na wielkość emisji dwutlenku węgla w procesie produkcji cementu ma metoda wypalania klinkieru i skład chemiczny nadawy surowcowej do pieca. W tabeli 1 przedstawiono wpływ metody wypalania na jednostkowe wskaźniki emisji.

Tabela 1. Wpływ metody wypalania klinkieru na jednostkowy wskaźnik emisji CO<sub>2</sub>

Wielkość	Jednostka	Metoda sucha <sup>1</sup>	Metoda sucha <sup>2</sup>	Metoda mokra
Zużycie ciepła	GJ/Mg kl	3,4	4,2	6,8
Wskaźnik emisji paliwowej*	kg CO <sub>2</sub> /GJ	94,5	94,5	94,5
Emisja paliwowa	kg CO <sub>2</sub> /Mg kl	321	397	643
Emisja surowcowa*	kg CO <sub>2</sub> /Mg kl	535	535	535
Emisja całkowita-klinkier	kg CO <sub>2</sub> /Mg kl	<b>856</b>	<b>932</b>	<b>1178</b>

\* wskaźnik emisji paliwowej i surowcowej jak dla pierwszego poziomu dokładności monitorowania emisji CO<sub>2</sub> [3],

<sup>1</sup> piec krótki z 4-ro stopniowym wymiennikiem cyklonowym ciepła,

<sup>2</sup> długi piec na metodę suchą.

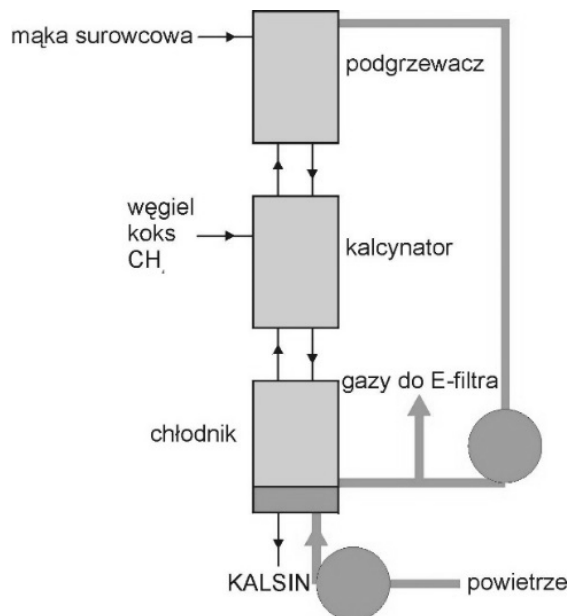
W wyniku modernizacji przemysłu cementowego wyeliminowana została praktycznie energochłonna metoda mokra, która obecnie stanowi niecałe 2% produkcji w Polsce. Z danych przedstawionych w tabeli 1 wynika, że średnia emisja CO<sub>2</sub> w warunkach krajowych, związana z wyprodukowaniem 1Mg klinkieru cementowego, wynosi ok. 856kgCO<sub>2</sub> (ok. 670kgCO<sub>2</sub>/Mg cem.), z tego ok.60% stanowi emisja z surowca (535 kgCO<sub>2</sub>/Mg kl). Uwzględniając aktualną zdolność produkcyjną cementowni w Polsce, emisja w skali roku wynosi około 11 mln.Mg CO<sub>2</sub>.

### 3. Technologiczne metody redukcji emisji dwutlenku węgla

Zgodnie z polityką klimatyczną Unii Europejskiej przemysł cementowy, podobnie jak energetyczny, został zobowiązany do redukcji emisji CO<sub>2</sub>. Przeprowadzona w ostatnich latach restrukturyzacja krajowego przemysłu cementowego (likwidacja metody mokrej) oraz zastosowanie nowych energooszczędnych technik wytwarzania cementu spowodowało, że uzyskano już znaczną, ponad 25% redukcję dwutlenku węgla[4]. Dalszą poprawę efektywności energetycznej oraz zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub> można uzyskać poprzez:

- obniżenie udziału klinkieru w cemencie,
- wykorzystanie w procesie paliw i surowców odpadowych,
- zagospodarowanie ciepła odpadowego,
- nowe, niskoemisyjne techniki produkcji cementu.

Są to działania, które zostały już w znacznym stopniu zastosowane albo będą sukcesywnie wdrażane. Nowym działaniem, które w Polsce nie znalazło jeszcze zastosowania, jest produkcja spoiwa hydraulicznego (zamiennika tradycyjnego klinkieru) z surowców odpadowych o niskiej zawartości węglanów. W dążeniu do ograniczenia energochłonności i emisji gazowej prowadzone są na świecie badania dotyczące nowych technik wypalania w reaktorach statycznych [4]. Rozwój metod wypalania w reaktorach statycznych, jaki obserwuje się na świecie, wynika z dużego zapotrzebowania na urządzenia o stosunkowo niedużej - rzędu kilku Mg/h - wydajności, charakteryzujące się niskimi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi w stosunku do tradycyjnego pieca obrotowego. Przykładem takiego rozwiązania jest technologia K-Tech, której schemat przedstawiono na rys.3.



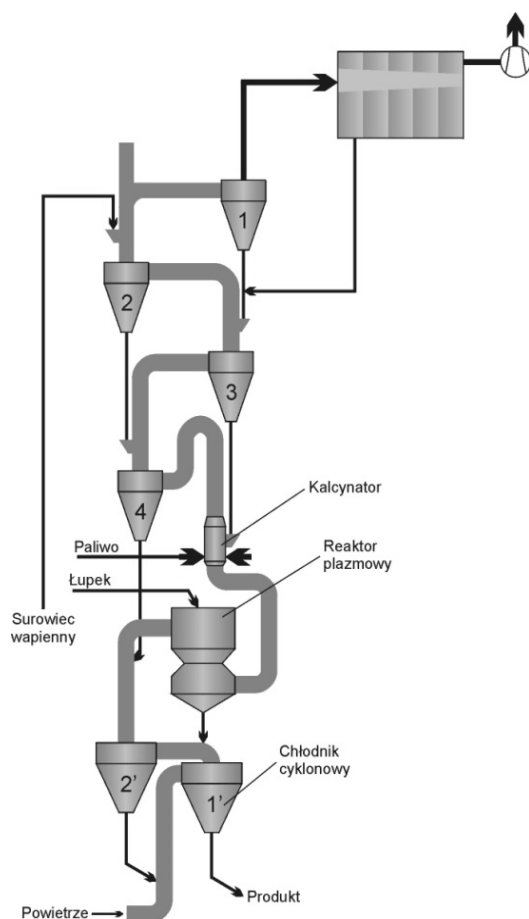
Rys. 3. Schemat technologii K-Tech

Technologia ta polega na wypalaniu w złożu fluidalnym mieszanki surowcowej o obniżonym module nasycenia, przygotowanej z odpadowych surowców wapiennych, które nie mogą być wykorzystane w tradycyjnej metodzie produkcji cementu. Otrzymany produkt, tzw. Kalsin, o właściwościach hydraulicznych podobnych do klinkieru, jest jego częściowym zamiennikiem w procesie przemiału cementu. Zaletą tej technologii, oprócz niskich kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych, są znaczące korzyści ekologiczne, które wynikają z wykorzystania odpadów i ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. W tradycyjnej technologii produkcji cementu emisja CO<sub>2</sub> wynosi ok. 0,7 kg/kg cementu, natomiast w technologii K-TECH, dla podobnych warunków, zaledwie 0,3 kg CO<sub>2</sub>/kg [5].

Niskie koszty inwestycyjne, znaczne o ok. 37% obniżenie energochłonności w porównaniu do klinkieru produkowanego tradycyjnie w piecu obrotowym oraz redukcję emisji gazów cieplarnianych powodują, że jest to przyszłościowa technologia, która może być znaczącym sposobem redukcji CO<sub>2</sub>.

Podobnym rozwiązaniem jest metoda FAKS (Fluidized Bed Advanced Cement Kiln System) opracowana przez firmę KAWASAKI-Japonia [4]. Uzyskane wskaźniki technologiczne produkcji klinkieru metodą FAKS są podobne do uzyskanych w technologii K-tech. Oprócz znacznego 20% obniżenia zużycia ciepła w stosunku do tradycyjnego wypalania, uzyskano redukcję emisji CO<sub>2</sub> od 10-25% i dodatkowo redukcję NO<sub>x</sub> o ok.40%. Efekty techniczno-ekologiczne technik wypalania w reaktorach statycznych są argumentem przemawiającym za rozwojem tych przyszłościowych niskoemisyjnych technik wypalania. Na rys.4 przedstawiono stanowisko badawcze opracowanego sposobu wypalania w reaktorze statycznym, w którym spiekanie odbywa się w reaktorze plazmowym typu RPP (rotacyjnie poszerzonej plazmie). Różnica w stosunku do wyżej przedstawionych metod polega na wykorzystaniu plazmy niskotemperaturowej. Wstępne przygotowanie (podgrzanie mieszanki surowcowej i jej dekarbonizacja) surowca będzie

podobne do wypalania w piecu obrotowym z wielostopniowym wymiennikiem ciepła. Jako czynnik termiczny i transportujący mieszaninę w układzie cyklonów wykorzystane zostaną gazy odlotowe z reaktora plazmowego. Gazy te są mieszaniną produktów spalania odpadów powęglowych, które stanowią składnik mieszaniny oraz gazu plazmotwórczego.



Rys. 4. Schemat stanowiska badawczego instalacji wypalania w reaktorze statycznym z reaktorem plazmowym

Pierwsze próby wypalania materiału wstępnie zdekarbonizowanego w plazmie potwierdziły możliwość uzyskania spieku podobnego własnościami do klinkieru. Metoda ta wymaga jeszcze dodatkowych badań, które pozwolą opracować projekt instalacji przemysłowej.

Ważnym argumentem przemawiającym za rozwojem tych technologii, oprócz możliwości znacznej redukcji CO<sub>2</sub> oraz niskich kosztów inwestycyjnych, jest to, że mogą być one uruchomiona w miejscu powstawania odpadów.

#### 4. Nadbudowa pieca obrotowego układem kogeneracyjnym

Poprawa efektywności energetycznej, zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii oraz czystych technologii energetycznych są to istotne działania w celu ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Nowoczesne technologie wypalania, w krótkich piecach obrotowych z 5-cio stopniowym wymiennikiem cyklonowym ciepła i układem wstępnej kalcynacji charakteryzują się tylko ok.50% sprawnością. Niska sprawność energetyczna wysokotemperaturowego procesu wypalania klinkieru wynika głównie z wysokich strat ciepłych. Główne źródła tych strat to:

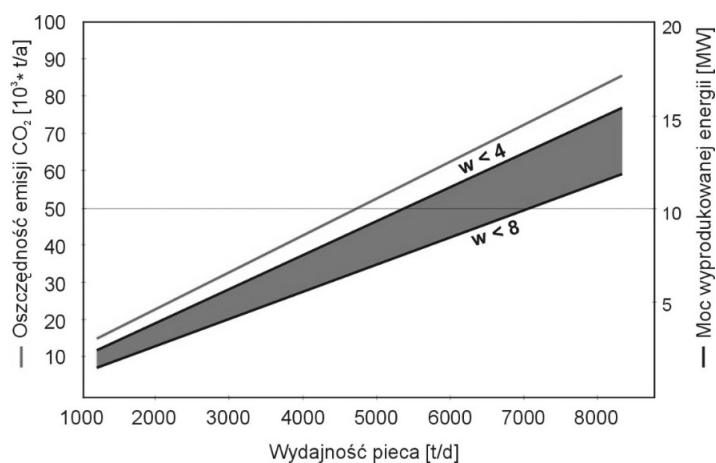
- entalpia gazów odlotowych,
- entalpia powietrza nadmiarowego z chłodnika klinkieru,
- promieniowanie i konwekcja gorących powierzchni pieca obrotowego.

W związku z tym aktualny jest problem obniżenia tych strat oraz zagospodarowania ciepła odpadowego. W ostatnich latach coraz powszechniej stosowaną metodą wykorzystania procesowej entalpii odpadowej jest wykorzystanie jej do produkcji energii elektrycznej. Dotychczas stosowany sposób wykorzystania ciepła odpadowego w procesie suszenia surowców i paliwa, ze względu na intensyfikację procesu wypalania oraz niższe wilgotności, jest już niewystarczający. Nowe, niskotemperaturowe techniki wytwarzania energii w układzie ORC (Organic Rankine'a Cycle) - Organiczny Obieg Rankine'a stworzyły inne możliwości wykorzystania procesowej entalpii odpadowej, polegające na nadbudowie pieca obrotowego układem kogeneracyjnym. Skojarzenie procesu wypalania klinkieru w piecu obrotowym z procesem wytwarzania energii, tzw. układ WHR (Waste Heat Recovery), oprócz poprawy sprawności energetycznej procesu, ograniczenia zużycia paliw naturalnych, mają również korzystny wpływ na środowisko. Produktem jest tzw. „czysta” energia elektryczna (Clean Energy), wyprodukowanie której odbywa się bez zużycia paliwa naturalnego i emisji szkodliwych gazów. Nowoczesne instalacje wytwarzania energii elektrycznej stosowane w przemyśle cementowym, zabezpieczają już ponad 30% zapotrzebowania na energię elektryczną przez cementownię. Wyprodukowanie 1kWh energii w elektrowni węglowej jest obciążone emisją około 0,8 kg CO<sub>2</sub>. W związku z tym, każda kWh wyprodukowana w układzie kogeneracyjnym, nadbudowanym na piecu obrotowym, pozwoli pośrednio ograniczyć (o ok.0,8kg CO<sub>2</sub>/kWh) emisję. Średni odzysk energii w nowych układach kogeneracyjnych zainstalowanych w cementowniach, wynosi ok. 30-45 kWh/Mg kl [ 6].

Na wykresie rys.4 przedstawiono teoretyczne moce możliwe do uzyskania w układach WHR i wielkość redukcji emisji dwutlenku węgla w zależności od wydajności pieca i wilgotności surowca. Z przedstawionych danych wynika, że krajowe cementownie mogą teoretycznie (przyjmując średnią wilgotność krajowych surowców w=7%) za pomocą instalacji WHR wyprodukować łącznie „czystą” bez emisji energię elektryczną o mocy ok.50 MW, co by pozwoliło dodatkowo na średnie ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> w skali roku na poziomie około 0,4 mln Mg/r.

Uwzględniając stosunkowo wysokie koszty instalacji WHR (ok.2mln euro za 1MW) i ciągle jeszcze małe zainteresowanie w kraju tymi rozwiązaniami oraz znaczne wykorzystanie entalpii gazów odlotowych z pieca obrotowego w innych procesach (suszenie surowców i węgla), należy przyjąć znacznie niższą moc wytwarzanej energii i wynikające z tego ograniczenie emisji.

Prognozowane na lata 2013-2020 zapotrzebowanie na emisję CO<sub>2</sub> przez przemysł cementowy w Polsce, to ok. 12mln Mg CO<sub>2</sub>/r ,natomiast propozycja (alokacja) Komisji UE wynosi średnio tylko ok. 8,6mln Mg CO<sub>2</sub>/r.



Rys.5. Wpływ wydajności pieca i wilgotności surowca na moc w energii

Wynika z tego, że przy obecnym, już bardzo wysokim technologicznym ograniczeniu emisji CO<sub>2</sub>, która uzupełniona dodatkową redukcją wynikającą z ewentualnego wdrożenia układów WHR, nie pozwoli spełnić zakładanych wymagań zgodnie z przyznaną alokacją emisji CO<sub>2</sub>. Spodziewany deficyt to jeszcze ok. 3 mln Mg CO<sub>2</sub>/r. Uwzględniając zakładany po roku 2020 wzrost produkcji cementu (ok.20 mln Mg/r cementu) oraz dalsze ograniczenie dopuszczalnej emisji CO<sub>2</sub>, deficyt ten będzie jeszcze wyższy. W związku z tym, przemysł będzie musiał dokupić brakującą emisję. Wynikiem tego będzie wzrost cen cementu lub ograniczenie produkcji do poziomu przyznanej alokacji.

## 5. Nowe nietechnologiczne metody redukcji emisji CO<sub>2</sub>

Jak wynika z przedstawionej wyżej oceny przemysłu cementowego, przy obecnym poziomie technicznym możliwości technologiczne dalszego ograniczenia emisji dwutlenku węgla są praktycznie już mocno ograniczone. Uwzględniając konieczność dalszej redukcji gazów cieplarnianych, co wynika z planowanego nowego, po roku 2020, pakietu klimatycznego i zakładanego wzrostu produkcji, celowe jest poszukiwanie innych, nie tylko technologicznych metod redukcji. W związku z tym, przemysł cementowy zmuszony będzie do poszukiwania innych nietechnologicznych metod redukcji. Sposobem takim może być technologia CCS, polegająca na wychwytywaniu i następnie składowaniu CO<sub>2</sub> w głębokich warstwach geologicznych [7,8]. Jest to technologia szeroko badana na świecie głównie pod kątem wykorzystania jej w sektorze energetycznym.

Aktualnie w procesach energetycznych rozwijane są następujące technologie wychwytywania CO<sub>2</sub>:

1. **Post-combustion,**
2. **Oxyfuel,**
3. **Pre-combustion,**
4. **Sekwestracja w produktach chemicznych**

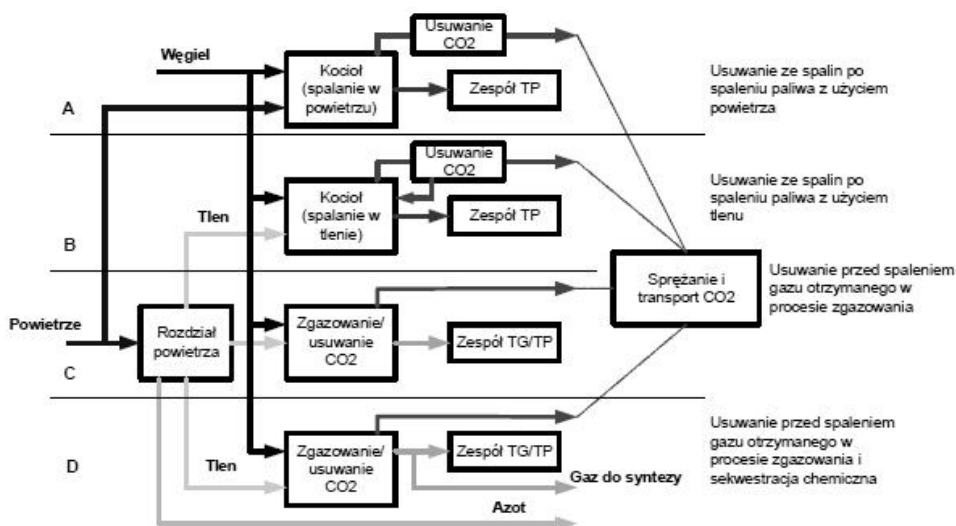
Proces ten polega na wychycie - absorpcji CO<sub>2</sub> w wodnym roztworze amin i następnie wydzieleniu – odwodnieniu w desorberze. Wydzielony ze spalin dwutlenek



węgla jest następnie sprężony i przetransportowany do miejsca zatłoczenia – magazynowania.

Różnica pomiędzy w/w technikami wychwytu polega głównie na sposobie spalania paliwa i tego po jakim procesie jest on poddany absorpcji. W metodzie Oxyfuel węgiel spalany jest w mieszaninie tlenu i dwutlenku węgla, natomiast w Post-combustion tradycyjnie - w powietrzu. W obu tych technologiach wychwytywanie odbywa się po procesie spalania paliwa, ze spalin. Natomiast w technologii Pre-combustion wychwytywanie odbywa się przed spalaniem gazu wytworzonego w procesie zgazowania węgla (przed spalaniem). Techniki wychwytywania dwutlenku węgla są już rozpoznane i stosowane w przemyśle, lecz aby umożliwić ich zastosowanie w energetyce czy w wysokotemperaturowych procesach technologicznych (np. wypalania klinkieru cementowego), wymagają jeszcze badań.

Na rys.5. przedstawiono na przykładzie elektrowni sposób realizacji wyżej scharakteryzowanych technologii CCS.



Rys.5. Schemat technologii CCS, [8]

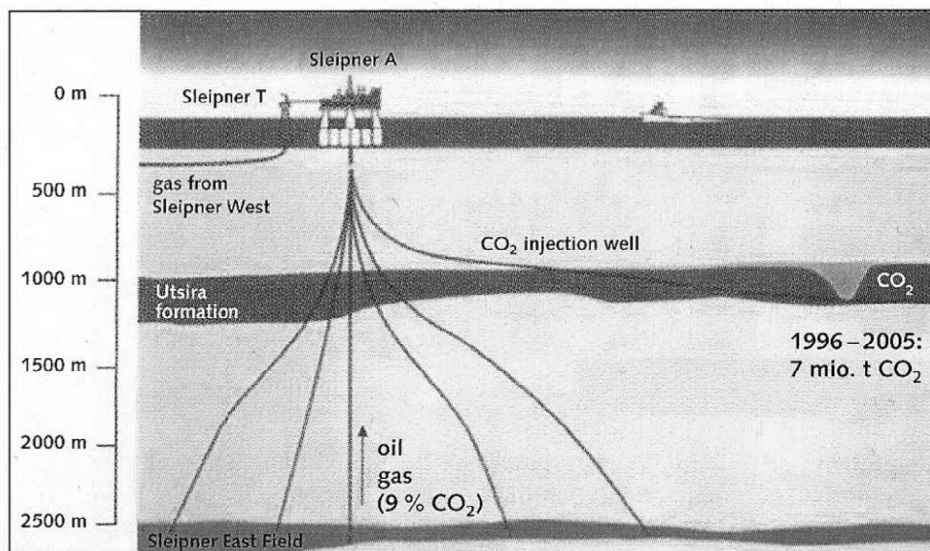
O ważności tych badań świadczą przygotowane dyrektywy unijne (tzw. Dyrektywa CCS) i rozporządzenia krajowe. Przyjmuje się, że zastosowanie technologii CCS na świecie pozwoli ograniczyć emisję CO<sub>2</sub> z głównych źródeł (z energetyki, przemysłu cementowego i hutnictwa) o ok. 25-30%. Negatywnym skutkiem zastosowanie technologii CCS w tych przemysłach, będzie wzrost kosztów produkcji, który jest wynikiem wysokich kosztów wychwytywania i składowania CO<sub>2</sub> w głębokich strukturach geologicznych.

Dla przemysłu cementowego są to ciągle jeszcze technologie przyszłościowe, jednak ze względu na prognozowane większe ograniczenia dopuszczalnych emisji gazów cieplarnianych oraz wyczerpane już praktycznie możliwości dalszej redukcji poprzez zmiany technologiczne, procesowe, wymagają już dzisiaj intensywnych badań dostosowujących te techniki do konkretnych technik wypalania klinkieru.

Technologia CCS jest złożonym problemem logistycznym, obejmującym etapy: dostarczenia i spalania paliwa, wychwytywania CO<sub>2</sub>, jego transportu do składowiska i na końcu zatłoczenia do górotworu oraz kontrolowania, bezpiecznego magazynowania. Jako całość, proces logistyczny, dotyczący technologii CCS, jest rozwiązaniem nowym, niemającym wzorca. Można natomiast znaleźć rozwiązania i praktyczne zastosowania niektórych etapów technologii CCS. Przykładem takich rozwiązań może być wychwytywanie dwutlenku węgla w przemyśle chemicznym. Są to jednak znacznie mniejsze instalacje od zakładanych w CCS. Doświadczenia te mogą być wykorzystane przy opracowaniu nowych, o znacznie większej wydajności, instalacji do separacji CO<sub>2</sub>. Podobnie wygląda problem składowania CO<sub>2</sub> w głębokich warstwach geologicznych. Zatłaczanie CO<sub>2</sub> stosowane jest powszechnie w przemyśle naftowym w celu intensyfikacji wydobywania ropy naftowej lub gazu ziemnego. Magazynowanie gazu wymaga jednak odpowiednich warunków struktury geologicznej. Zalecanymi zgodnie z (Raport IPCC SRCCS) warstwami geologicznymi do składowania CO<sub>2</sub> to są [9]:

- głębokie poziomy wodonośne – solankowe,
- wyeksploatowane złoża ropy naftowej i gazu,
- nieeksploatowane, zawierające metan, pokłady węgla.

Stosunkowo prostym i bezpiecznym sposobem składowania CO<sub>2</sub> jest zatłaczanie go do wyeksploatowanych złóż naftowych. Mniej bezpieczne jest składowanie w głębokich, nieeksploatowanych złożach węgla. Na rys.6 przedstawiono schematycznie instalację składowania w obszarach wodonośnych - solankowych. Jest to instalacja Sleipner, zrealizowana na Morzu Północnym w ramach projektu SACS („Składowanie CO<sub>2</sub> w solankach”) na polach naftowych pod koniec lat 90 XX w. Rocznie składowuje się około 1 mln Mg CO<sub>2</sub> [10].



Rys.6. Schemat instalacji składowania dwutlenku węgla pod dnem Morza Północnego [10]

Istotnym, zarówno ze względu na koszty jak i bezpieczeństwo, jest transport dwutlenku węgla z miejsca wydzielenia-wychwycenia do punktu zatłaczania- magazynowania.

Transport CO<sub>2</sub> odbywa się w stanie skroplonym. Stosowane są dwa rodzaje transportu: cysternami lub rurociągami. Wybór sposobu transportu zależy głównie od ilości gazu oraz od odległości źródła CO<sub>2</sub> do miejsca zatłaczania (magazynowania). Przyjmuje się, że dla małych ilości gazu (< 2mln Mg/r) należy stosować transport cysternami, natomiast dla większych ilości dwutlenku węgla uzasadniony jest transport rurociągami.

Z przeprowadzonych wstępnych analiz kosztów dotyczących technologii CCS wynika, że koszty składowania 1Mg CO<sub>2</sub> szacowane są na ok. 45-55 euro. Z tego około 80-90% stanowią koszty związane z budową i eksploatacją instalacji wychwytywania, natomiast koszty transportu i składowania stanowią resztę tj.10-20% [8]. Z analiz tych wynika również, że przy tak wysokich kosztach CCS korzystniej jest wykupić dodatkową alokację emisji, a nie redukować metodą CCS. Oczywiście, takie rozwiązanie jest nie do przyjęcia, ponieważ celem jest redukcja emisji CO<sub>2</sub>. W związku z tym, prace badawcze dotyczące technologii CCS koncentrują się głównie na obniżeniu kosztów budowy i eksploatacji oraz bezpieczeństwie składowania. Pierwsze próby wdrożenia CCS dotyczą głównie instalacji demonstracyjnych na których realizuje się prace badawcze.

Polska, podobnie jak inne kraje UE, ograniczyła również swoje działania badawcze do projektu demonstracyjnego CCS ( w Elektrowni Bełchatów), dotyczącego redukcji emisji w procesie wytwarzania energii elektrycznej. Celem tych badań jest m.in. zbadanie celowości zastosowania technologii CCS w skali przemysłowej oraz ocena wpływu na środowisko procesu składowania i wpływ tej technologii na koszty wytwarzania energii i innych produktów.

Ze względu na wysokie koszty redukcji CO<sub>2</sub> metodą CCS celem jest poszukiwanie innego niż zatłaczanie sposobu utylizacji wychwyconego z procesu gazu. Coraz częściej w gronie specjalistów można usłyszeć, że dwutlenek węgla nie jest odpadem, a również towarem. Problemem jest znalezienie komercyjnych sposobów wykorzystania tego gazu. Nowy sposób utylizacji dwutlenku węgla posiada już swoją nazwę, jest to tzw. technologia CCU (ang. Carbon Capture Utylization). W poszukiwaniu technologii wykorzystania wydzielonego z procesu CO<sub>2</sub> prym wiodą Stany Zjednoczone i Niemcy. Nowe, innowacyjne technologie wykorzystania dwutlenku węgla mogą spowodować zmianę stanowiska społeczeństwa dotyczącą CCS, która dotychczas nie została zaakceptowana przez nie.

## 6. Posumowanie

Przemysł cementowy ze względu na technologię wytwarzania klinkieru (proces dekarbonizacji) oraz duże zużycie węgla należy do przemysłów emitujących znaczne ilości CO<sub>2</sub>. Proces technologiczny wypalania klinkieru znacznie ogranicza możliwości dalszej redukcji emisji dwutlenku węgla. Wynika to z rodzaju stosowanego paliwa, którym jest i pozostanie węgiel, jak również wysokiej emisji procesowej związanej z procesem dekarbonizacji węglanów. W związku z tym, dotychczasowe działania dotyczące redukcji CO<sub>2</sub> koncentrują się głównie na wykorzystaniu paliw alternatywnych, w tym biomasy, ograniczeniu klinkieru w cemencie oraz stosowaniu surowców o niższej zawartości węglanów (popioły lotne, żużle wielkopiecowe). Jak wynika z występującego już braku pozwoleń na emisję i konieczności dalszych, po roku 2020, redukcji istnieje duże niebezpieczeństwo, że wynikiem tego będzie ograniczenie produkcji cementu lub wzrost jego ceny wynikający z potrzeby zakupu pozwoleń na dodatkową emisję CO<sub>2</sub>. Ze względu na ograniczone już możliwości technologicznego ograniczenia emisji CO<sub>2</sub>, należy poszukiwać innych, pośrednich metod redukcji emisji. Rozwiązaniem takim może być,

podobnie jak w energetyce metoda CCS lub CCU. Są to technologie, które ze względu na wysokie koszty i złożone problemy logistyczne mogą być traktowane jako przyszłościowe po wyczerpaniu innych, tańszych sposobów.

### Literatura

1. Duda J.: Nowe wyzwanie wynikające z pakietu klimatyczno-energetycznego dla przemysłu materiałów budowlanych i ceramicznych. Prace ICiMB, nr13/2014, s.
2. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/31/WE z 23 kwietnia 2009 r. w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla oraz zmieniająca dyrektywę Rady 85/337/EWG,
3. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 12 września 2008r. w sprawie sposobu monitorowania wielkości emisji substancji objętych wspólnotowym systemem handlu uprawnieniami do emisji (Dz. U. Nr 183/2008 poz. 1142),
4. Duda J.: „Energoszczędne i proekologiczne techniki wypalania klinkieru cementowego”, Prace IMMB, Opole, 2004,
5. Paliard M., High Energy Savings through the Use of a New High-Performance Hydraulic Component – The K-Process, Materiały Thermie, Berlin 1992, s.457-468.
6. Duda J.: Dlaczego ORC jest najlepszym rozwiązaniem do wykorzystania energii odpadowej w cementowni, Prace Instytutu Ceramiki I Materiałów Budowlanych nr 9, Warszawa-Opole 2012, s.32-43,
7. Gąsiorowska E.: Technologia CCS –szansa czy ślepa uliczka? Studia BAS Nr 1(21) 2010, s. 219–236, [www.bas.sejm.gov.pl](http://www.bas.sejm.gov.pl)
8. Ściążko: Technologie wychwytywania dwutlenku węgla, Raport Technologia wychwytywania i geologicznego składowania dwutlenku węgla (CCS) sposobem na złagodzenie zmian klimatu, [http://www.pkpplewiatan.pl/upload/File/2009\\_05/RAPORT%20CCS.pdf](http://www.pkpplewiatan.pl/upload/File/2009_05/RAPORT%20CCS.pdf).
9. [www.ipcc.ch/pub/reports.htm](http://www.ipcc.ch/pub/reports.htm).
10. Kretzschmar H-J., Lubenau U.: CO<sub>2</sub> Untergruntspeicherung und Zementindustrie, Zement Kalk Gips, 6/2005, s.59-67,

Dr hab. inż. Jerzy DUDA, prof. PWSZ  
Instytut Zarządzania  
Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nysie  
48-300 Nysa, ul. Armii Krajowej 7  
e-mail: [jerzy.duda@pwsz.nysa.pl](mailto:jerzy.duda@pwsz.nysa.pl)

Mgr. inż. Jacek TOMASIAK  
Instytut Zarządzania  
Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nysie  
48-300 Nysa, ul. Armii Krajowej 7  
e-mail: [jacek.tomasiak@pwsz.nysa.pl](mailto:jacek.tomasiak@pwsz.nysa.pl)