

Potencjał przemysłu cementowego w redukcji emisji CO₂

Emisja antropogenicznego CO₂ na świecie w 2016 r. wyniosła 36 Gt i od trzech lat się nie zmienia, głównie dzięki redukcji emisji w USA i Chinach. Około 3,5 Gt CO₂ zostało wyemitowane w Europie. Jedna trzecia emisji pochodzi z produkcji energii przy użyciu węgla. Udział przemysłu cementowego stanowi około 5% (rys. 1).

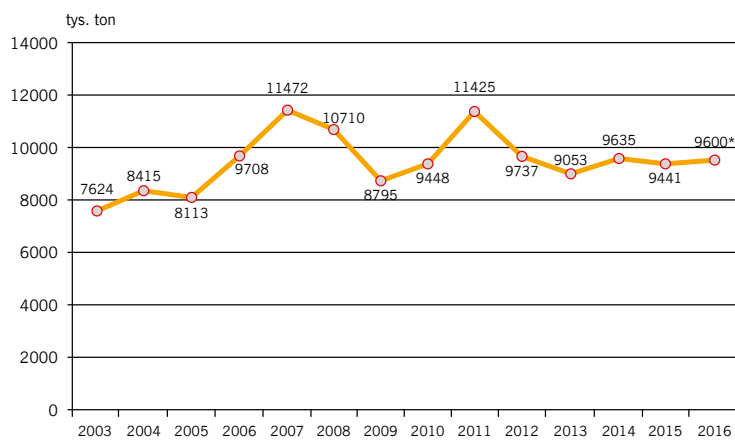
Realizacja celów unijnych w zakresie znaczącej dekarbonizacji w przemyśle w Europie oznacza dla sektora cementowego redukcję o 80% emisji gazów cieplarnianych w roku 2050 w stosunku do roku 1990. Osiągnięcie tak ambitnego celu – obniżenia emisji CO₂ ze 170 do 34 mln ton w przemyśle cementowym jest dużym wyzwaniem dla przemysłu europejskiego. Połowa emitowanego w cementowni CO₂ pochodzi z rozkładu surowców (głównie węgla wapnia), 40% jest wynikiem spalania paliwa i około 10% jest związane ze zużyciem energii elektrycznej. O ile istnieje możliwość ograniczenia emisji z paliw poprzez np. udoskonalenie technologii procesu produkcyjnego i zmniejszenie ilości zużywanego paliwa na jednostkę produktu czy zastępowanie paliw konwencjonalnych paliwami alternatywnymi, zawierającymi biomasę, to wpływ na emisję procesową jest znacznie ograniczony – należałoby zastąpić dotychczas stosowane surowce (kamień wapienny) innymi, w porównywalnych ilościach. Rozważania na temat celu redukcyjnego na poziomie 80% w przemyśle cementowym prowadzą do wniosku, że wymagałoby to fundamentalnej zmiany istniejącego modelu biznesowego z zastosowaniem całego szeregu rozwiązań w jednym czasie. Nie ma jednej technologii, która pozwoliłaby na tak znaczącą redukcję emisji. W przewidywaniach dotyczących roku 2030 i 2050 można zakładać prowadzenie działań na wielu polach jednocześnie, które sumarycznie przyniosą efekt w postaci redukcji emisji CO₂ w sektorze cementowym. Działania te obejmują dalszy wzrost efektywności zużycia energii cieplnej i elektrycznej, wykorzystanie surowców odpadowych, paliw alternatywnych i biomasy, obniżenie udziału klinkieru w cemencie i opracowywanie nowych, niskoemisyjnych materiałów wiążących oraz wychwytywanie i składowanie CO₂

(CO₂ capture and storage – CCS) lub wychwytywanie i użycie CO₂ (CO₂ capture and use – CCU). Największy potencjał redukcyjny wykazuje wychwytywanie CO₂ i składowanie lub dalsze jego zagospodarowanie. Jest to jednak obecnie najbardziej kosztowne rozwiązanie, zarówno pod względem inwestycyjnym jak eksploatacyjnym, a ponadto nadal pozostaje do rozwiązania wiele problemów technicznych, środowiskowych i społecznych.

Efektywność zużycia energii cieplnej

Przemysł cementowy jest przemysłem kapitałochłonnym a produkcja cementu jest procesem energochłonnym. Czas eksploatacji pieców cementowych wynosi zwykle 30-50 lat. Nowe piece są instalowane przeważnie tam, gdzie spodziewany jest rozwój rynku na cement. Największy efekt w postaci znaczącego obniżenia jednostkowego zużycia ciepła w cementowni przynosi zmiana energochłonnej mokrej metody produkcji na energooszczędną metodę suchą. Pomimo długiego okresu eksploatacji zakłady cementowe są stale modernizowane i praktycznie po 20-30 latach większość wyposażenia technicznego cementowni (podgrzewacze cyklonowe, chłodniki klinkieru, palniki) jest wymienione na nowe i przystosowane do nowych technologii. Modernizacja pozwala na obniżenie jednostkowego zużycia ciepła i energii elektrycznej. Obecnie, najlepszą dostępną metodą produkcji cementu są piece metody suchej z podgrzewaczem cyklonowym. I nie ma przesłanek do tego, aby ta technologia mogła być zastąpiona inną przełomową technologią wprowadzającą istotne zmiany w produkcji cementu. Tak więc możliwości redukcji CO₂ związane z efektywnością energetyczną są obecnie już znacznie ograniczone. W przemyśle cementowym w Polsce w wyniku modernizacji wszystkich zakładów i zainstalowaniu suchej metody produkcji średnie zużycie ciepła zostało zredukowane o 40%. Trzeba podkreślić, że wysoki udział ciepła z paliw alternatywnych, jak to ma miejsce w cementowniach w Polsce, wpływa w niewielkim stopniu na wzrost średniego wskaźnika zużycia ciepła (rys. 1).

Rys. 1. Emisja CO₂ w przemyśle cementowym w Polsce. (* szacunek)



Zużycie energii elektrycznej

W suchej metodzie produkcji cementu około 2% energii elektrycznej jest zużywane na etapie wydobycia surowców, 25% na przygotowanie zestawu surowcowego, 25% na wypał klinkieru portlandzkiego i dodatkowe 3% na przygotowanie paliwa, 43% na mielenie cementu i 3% na pakowanie i załadunek. Opierając się na danych CSI GNR, w latach 2012-2014 średnie zużycie energii elektrycznej wyniosło 104 kWh/tonę cementu – są instalacje, które osiągnęły wynik 85 kWh oraz takie, których zużycie wynosi około 130 kWh. W przemyśle cementowym w Polsce średnie zużycie energii elektrycznej wynosi obecnie 103 kWh/tonę cementu. W ostatnich 20 latach nastąpiła istotna popra-

wa w zakresie zużycia energii elektrycznej, jednak obecnie można zaobserwować powolne odwrócenie kierunku tych zmian - pojawiają się czynniki sprzyjające wzrostowi zużycia energii elektrycznej – zapotrzebowanie na cementy o wyższej wytrzymałości, a tym samym o większej powierzchni właściwej, czy zaostrzenie wymagań w zakresie ochrony środowiska powoduje konieczność instalowania coraz większej liczby urządzeń do redukcji emisji w cementowni. Również nowoczesne, zaawansowane technicznie rozwiązania pozwalające na obniżenie zużycia ciepła w procesie wypału klinkieru z drugiej strony powodują wzrost zużycia energii elektrycznej w zakładzie. Najwięcej energii elektrycznej w cementowni zużywa się w procesach przemiatu, tak więc znaczącą redukcję można uzyskać, instalując wysokowydajne systemy mielenia. Ta zmiana modernizacyjna jest związana z wysokimi nakładami inwestycyjnymi i może być przeprowadzona tam, gdzie spodziewany jest rozwój zapotrzebowania na cement lub gdy zachodzi konieczność wymiany przestarzałych urządzeń na nowe. Przewiduje się, że w roku 2030 średnie zużycie energii elektrycznej w przemyśle cementowym mogłoby być obniżone do poziomu 100 kWh/t cementu, a w roku 2050 do 90-95 kWh, pod warunkiem że nie uwzględniałoby się technologii wychwytywania i składowania lub użycia CO₂ (CCS/U – Carbon Capture and Storage/Use), która charakteryzuje się wysokim zużyciem energii elektrycznej. Jeśli CCS/U zostanie wdrożony na skalę przemysłową, zużycie energii w przemyśle cementowym znacząco wzrośnie. Szacuje się, że na poziomie cementowni może wzrosnąć o 50-120%, w zależności od zastosowanej technologii CCS/U.

Paliwa alternatywne

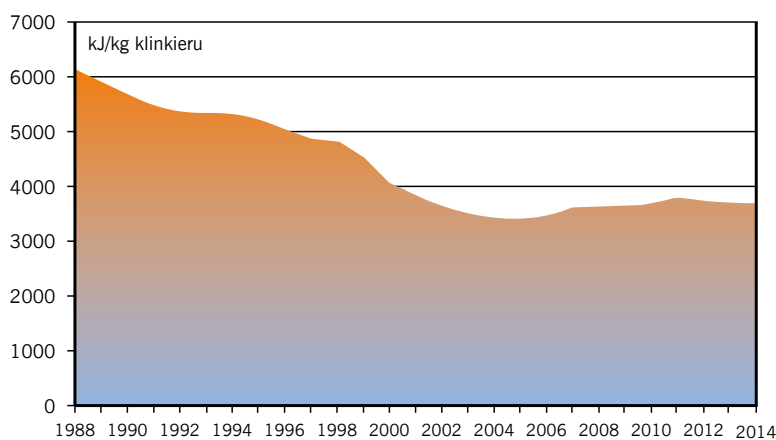
W 2014 r. średni poziom udziału ciepła z paliw alternatywnych w przemyśle cementowym na świecie wyniósł 16%, w Europie było to 41%. Polska jest obecnie liderem w wykorzystaniu paliw alternatywnych - szacuje się, że średni dla sektora poziom zastąpienia ciepła wynosi ponad 60%. Poszczególne cementownie mogą w ciągu roku osiągać poziom nawet 95% zastąpienia ciepła. Jednak warto podkreślić, że stosowanie paliw alternatywnych jest dużym wyzwaniem technicznym dla cementowni. Konieczne jest monitorowanie wielu parametrów paliw alternatywnych, jak wartość opałowa, zawartość chloru, metali ciężkich ze względu na bezpieczeństwo samego procesu wypału i właściwości cementu. W nowoczesnych piecach obrotowych wyposażonych w dekarbonizator można spalać nawet 60% paliw alternatywnych; paliwa alternatywne podawane na palnik główny powinny mieć wyższą wartość opałową porównywalną do paliwa konwencjonalnego. Wykorzystanie paliw alternatywnych w cementowni wiąże się z zainstalowaniem dodatkowych urządzeń w układzie pieca cementowego, jak np. wydajne by-passy chlorowe. Dodatkowy monitoring i urządzenia zapewniające bezpieczne stosowanie paliw alternatywnych w cementowni mogą powodować wyższe zużycie energii elektrycznej. Mimo tego, paliwa alternatywne stanowią duży potencjał, jeśli chodzi o redukcję emisji CO₂. Z jednej strony zawierają biomasę, która w systemie handlu emisjami CO₂ traktowana jest jako neutralna pod względem emisji CO₂, a z drugiej

termiczny odzysk energii z odpadów i zastępowanie nimi paliw kopalnych przyczynia się globalnie do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Wzrost udziału ciepła z paliw alternatywnych w przemyśle cementowym w większym stopniu zależy od uwarunkowań prawnych niż technicznych. Dla rozwoju tego sposobu zagospodarowania odpadów istotne jest zapewnienie dostępności odpowiednich odpadów do produkcji tego typu paliw.

Wskaźnik klinkier/cement

Nie tylko zastępowanie paliw kopalnych paliwami alternatywnymi jest korzystne z punktu widzenia emisji CO₂. Również obniżenie udziału klinkieru portlandzkiego – składnika cementu, którego wyprodukowanie wymaga dużej ilości ciepła (minerale klinkierowe syntezują w 1450°C) poprzez stosowanie różnych surowców odpadowych jest tego typu działaniem. Surowce odpadowe z innych branż, jak popiół lotny czy żużel wielkopiecowy, nie uwalniają gazów procesowych, bo są już zdekarbonizowane w innych procesach przemysłowych i nie wymagają dodatkowej energii na przeprowadzenie procesu dekarbonizacji w piecu cementowym. Bardzo istotna jest dostępność tego typu surowców wtórnych do wykorzystania w produkcji cementu, np. granulowanego żużla wielkopiecowego. Parametry jakościowe materiałów zastępujących klinkier odgrywają równie ważną rolę, np. pogarszanie się jakości popiołów lotnych ze względu na spalanie biomasy lub paliw na bazie odpadów. Według danych GNR, na świecie 10% cementowni obniżyło wskaźnik klinkier/cement do 65%, jednak w większości przypadków udział klinkieru w cemencie jest wysoki i wynosi 88%. W Polsce średni wskaźnik wynosi 71%, co oznacza, że z 1 tony klinkieru produkowane jest około 1,4 tony cementu – 400 kg stanowią różne dodatki odpadowe. Badania w zakresie poszukiwania nowych materiałów wykazujących właściwości wiążące, które mogłyby skutecznie zastąpić część klinkieru w cemencie, trwają – biorąc pod uwagę dostępność obiecującym materiałem, pozwalającym obniżyć wskaźnik klinkier/cement nawet do 50% przy zachowaniu parametrów wytrzymałościowych cementu jest mieszanina skalcyonowanej gliny i zmielonego kamienia wapiennego. Warto podkreślić, że dodatki do cementu w różny sposób wpływają na jego parametry, np. stosowanie kamienia wapiennego jako dodatku do cementu poprawia mrozoodporność czy odporność na siarczany za-

Rys. 2. Zużycie ciepła na produkcję klinkieru w przemyśle cementowym w Polsce



praw, jednak aby zagwarantować wytrzymałość normową, konieczny jest przemiał cementu do wyższych powierzchni właściwych. W tym miejscu warto wspomnieć, że wiele prac naukowych jest poświęconych opracowaniu różnych spoiw, których produkcja wymaga mniej energii w porównaniu do tradycyjnego klinkieru portlandzkiego, jak spoiwa żużlowo-alkaliczne, glinokrzemianowe spoiwa autoklawizowane, cementy belitowe czy cementy ekspansywne z dodatkiem glinosiarczanu wapnia. Na masową skalę spoiwa te jednak nie zastąpią cementu na bazie klinkieru portlandzkiego.

Wychwytywanie i składowanie lub użycie CO₂ (CCS/U – Carbon Capture and Storage/Use)

Technologia CCS/U ma największy potencjał jeżeli chodzi o redukcję emisji CO₂ w przemyśle cementowym. CCS jest technologią redukcji CO₂ ze źródeł przemysłowych poprzez oddzielenie i wychwycenie tego gazu ze spalin w celu jego składowania. Jedną z takich technologii, możliwą do zastosowania w przemyśle cementowym, jest wychwytywanie CO₂ po procesie spalania (post-combustion), która nie wymaga istotnych przeróbek w układzie pieca i może być zastosowana zarówno w nowych, jak i istniejących systemach piecowych. W tej metodzie wychwytywanie CO₂ może się odbywać w procesie chemicznej absorpcji, metodą membranową lub poprzez absorpcję fizyczną czy mineralną karbonatyzację. Obecnie najbardziej zaawansowane są badania nad chemiczną absorpcją – badania pilotażowe prowadzone są w kilku sektorach przemysłowych. Z tych prac wynika, że metoda chemiczna ma wysoką skuteczność w usuwaniu CO₂ ze strumienia spalin. Rozwój metody membranowej zależy od tego, czy uda się opracować membrany o wysokiej skuteczności separacji gazów. Proces mineralnej karbonatyzacji może być ciekawym rozwiązaniem w przypadku przemysłu cementowego ze względu na możliwość zawrócenia do układu pieca cementowego zużytego sorbentu, jako materiału surowcowego. Dopracowania wymaga szybkość przebiegu reakcji poprzez odpowiednie przygotowanie materiałów stosowanych w tej metodzie. Trwają prace nad zmodyfikowaną wersją tego procesu, który mógłby się odbywać w podgrzewaczu cyklonowym obrotowego pieca cementowego. Inną technologią wychwytywania CO₂ jest spalanie w tlenie – zamiast powietrza do spalania paliwa dostarczany jest tlen, co ułatwia oddzielenie strumienia CO₂ z gazów odlotowych. Dotychczasowe wyniki badań tej technologii pod kątem jej wykorzystania w przemyśle cementowym zakładają modyfikację polegającą na ulokowaniu procesu spalania w tlenie tylko w dekarbonizatorze. Jednak wydajność wychwytywania w tym przypadku jest niższa i wynosi około 60-70% w porównaniu do 85-95% skuteczności przy spalaniu w tlenie w całym układzie pieca. Z kolei technologia wychwytywania CO₂ przed procesem spalania (pre-combustion) ma bardzo ograniczone zastosowanie w przemyśle cementowym, gdyż obejmuje jedynie CO₂ z paliwa, a jak wiadomo przy produkcji cementu większa emisja CO₂ pochodzi z surowców. Wdrożenie na skalę przemysłową wychwytywania CO₂ wiąże się z bardzo wysokimi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi dla cementowni. W latach 2020-30 możliwe jest uruchomienie

kilku projektów, co przyniesie globalnie niewielką redukcję emisji CO₂. Dopiero po 2030 r. na większą skalę może być wykorzystana ta metoda redukcji, niemniej ocenia się, że w 2050 może ona obejmować zaledwie 10-15% światowej produkcji cementu. Transport i składowanie dużej ilości CO₂ nadal stanowi nierozwiązany problem, przede wszystkim dlatego, że nie ma odpowiedniej, wystarczającej infrastruktury, ale również ze względu na wysokie koszty i akceptację społeczną. Wychwycony CO₂ byłby transportowany do podziemnego obiektu składowania i trwale magazynowany w formacji geologicznej. Bardziej preferowanym rozwiązaniem jest wykorzystanie wychwyconego CO₂ w różnych reakcjach chemicznych, np. poprzez reakcję z wodorem produkcja polimerów, rozpuszczalników czy synteza metanolu. Badania skupiają się na kompleksowym podejściu do tej metody redukcji – wodór pochodziłby z elektrolizy wody przeprowadzonej z użyciem energii odnawialnej. Drugi składnik elektrolizy – tlen można by wykorzystać w procesie spalania w piecu cementowym. Na skalę przemysłową w jednej z cementowni został wdrożony projekt Skyminie – gazy odlotowe zawierające CO₂ są przepuszczane przez wieżę z roztworem NaOH i w wyniku reakcji powstaje wodorowęglan sodu. Realizowane są także projekty badawcze zakładające wykorzystanie mikroalg do wychwytywania i zagospodarowania strumienia CO₂ w procesie fotosyntezy. Sporą wadą tej technologii jest konieczność zapewnienia dużej ilości miejsca dla farmy alg. Niewielką część wychwyconego CO₂ można także wykorzystać w przemyśle spożywczym.

Trudno jest obecnie przewidzieć, jak rozwinie się w przyszłości na skalę przemysłową technologia wykorzystania wychwyconego CO₂. Zastosowanie technologii CCS/CCU w przemyśle cementowym z jednej strony pozwoliłoby na redukcję CO₂, ale również spowodowałoby poważny wzrost zużycia energii. Kluczowym czynnikiem będą bardzo wysokie koszty związane z jej wdrożeniem. Niektóre z opisanych technologii są nadal na wczesnym etapie rozwoju. Przemysł cementowy w Europie popiera koncepcję celu redukcyjnego emisji do roku 2050 i prowadzi badania w kierunku osiągnięcia tego celu. Jest gotów rozwijać i wdrażać w przyszłości tego typu technologie, jak CCS/CCU. Jednak im wyższe cele redukcyjne emisji CO₂ tym technologie redukcji stają się coraz kosztowniejsze. Na tym etapie dużo będzie zależeć, w jakim stopniu przemysł będzie wspierany, głównie przez odpowiednie ułatwienia prawne, w swoich wysiłkach na rzecz osiągnięcia celów redukcyjnych.

dr inż.. Bożena Środa
Stowarzyszenie Producentów Cementu

Literatura:

- 1 *Trends in Global CO₂ emissions, 2016 Report, Joint Research Center, European Commission.*
- 2 *CSI/ECRA Technology Papers 2017 Development of State of the Art. Techniques in Cement manufacturing: Trying to Look Ahead, Dusseldorf/Geneva, 20 marca 2017.*
- 3 *Informator Stowarzyszenia Producentów Cementu 2017.*
- 4 *Rola cementu w niskoemisyjnej gospodarce do roku 2050, Broszura SPC-Cembureau.*