



# Cementy niskoklinkierowe – terazniejszość i skomplikowana przyszłość

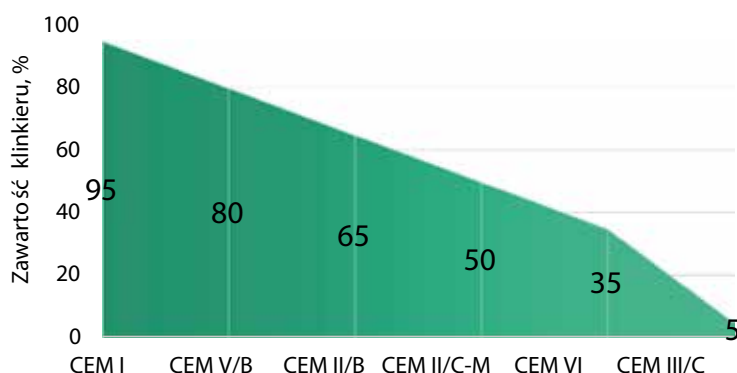
*Panteon w Rzymie – świątynia powstała w czasach cesarza Hadriana w 125 r. n.e. – to zaawansowany konstrukcyjnie obiekt budowlany, zbudowany z monolitycznego niezbrojonego betonu, który przetrwał 2000 lat. Z badań materiałów użytych do budowy tej świątyni wynika, że charakteryzowały się niską zawartością składników wiążących i wody, bardzo powolnym przyrostem wytrzymałości i praktycznie brakiem skurczu. Czy w obecnych czasach możemy sobie pozwolić na takie podejście, przy napiętych terminarzach budowlanych? Czy wznosząc monolityczne konstrukcje z niezbrojonego betonu można sobie pozwolić na dodatkowy wkład pracy przy pielęgnacji takiego betonu?*

Można założyć, że zmiany, jakie nastąpią w kolejnych kilkudziesięciu latach w rozwoju technologii cementu i betonu, i to jak będzie wyglądać budownictwo na koniec obecnego stulecia, będzie uzależnione od kilku czynników:

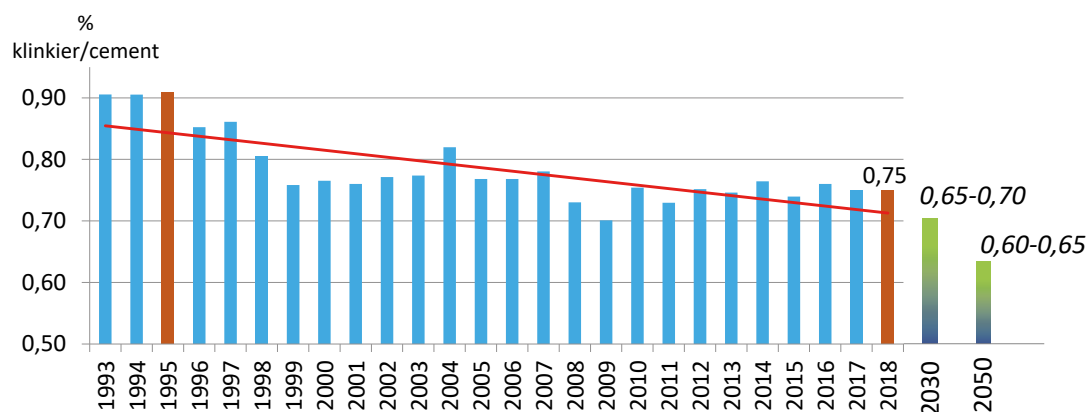
- 1) populacja i wzrost gospodarczy oraz globalne uprzemysłowienie
- 2) zmiany klimatu
- 3) źródła energii
- 4) dostępność zasobów naturalnych
- 5) rozwój technologii budowlanych
- 6) intensywne rozprzestrzenianie się technologii cybernetycznych i cyfrowych; oraz
- 7) polityka i regulacje rządowe.

W nadchodzących latach głównym wyzwaniem dla przemysłu, w tym cementowego, będzie dostępność źródeł energii, redukcja emisji CO<sub>2</sub> i koszty z tym związane. Opodatkowanie emisji CO<sub>2</sub> (aktualna cena w Europie powyżej 80 EUR/tonę CO<sub>2</sub>) silnie motywuje przemysł, aby poszukiwał skutecznych rozwiązań w zakresie obniżenia emisji gazów cieplarnianych. Wyprodukowanie tony klinkieru wiąże się z emisją około 0,850 tony CO<sub>2</sub> i co warto podkreślić – około 60% tej emisji, pochodzącej z rozkładu surowców węglanowych, nadal stanowi nierozwiązany problem.

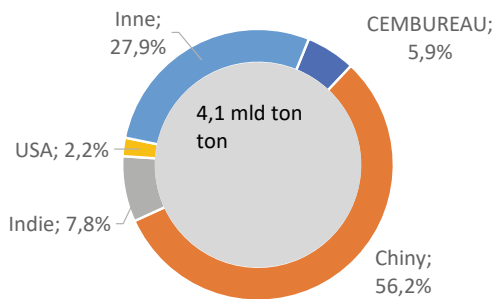
Mimo iż od dziesięcioleci produkuje się różne rodzaje cementu różniące się właściwościami i za-



Rys. 1. Zawartość klinkieru w cementach zgodnie z normą 197-1 i 197-5



Rys. 2. Wskaźnik klinkier/cement w przemyśle cementowym Polsce w ostatnich 25 latach



Rys.3. Światowa produkcja cementu w 2019 r.

wierające w swoim składzie inne, nieklinkierowe składniki główne, pochodzące przede wszystkim ze strumieni odpadów przemysłowych, to przez co najmniej wiek skład cementu portlandzkiego pozostaje w dużej mierze niezmienny. Popiół lotny, mielony, granulowany żużel wielkopiecowy, pył krzemionkowy czy naturalne pucolony są powszechnie mieszane z klinkierem portlandzkim, aby uzyskać cement, lub są używane jako zamiennik części cementu portlandzkiego w betonie. Produkcja i wykorzystanie tych cementów jest uwzględnione w odpowiednich normach budowlanych.

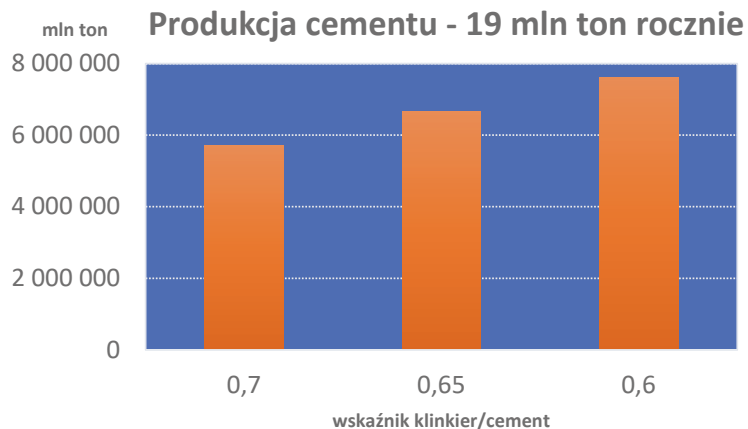
Obecnie w przemyśle cementowym w Polsce średni udział klinkieru w cemencie wynosi 75% i jest to wartość wyższa niż średnia europejska czy światowa (według Global Cement and Concrete Association średni wskaźnik klinkier/cement na świecie wynosi obecnie poniżej 0,65).

Obniżenie w cemencie zawartości klinkieru portlandzkiego, którego produkcja wiąże się z bardzo wysokim zużyciem energii (ok. 3,7 MJ/kg w Polsce) i zastąpienie go innymi zdekarbonizowanymi surowcami jest jednym ze sposobów redukcji emisji CO<sub>2</sub> z produkcji cementu. W mapie drogowej Europejskiego Stowarzyszenia Cementowego CEMBUREAU, w której przeanalizowano różne możliwości dekarbonizacji w przemyśle cementowym w Europie, zakłada się, jako jedną z wielu możliwości redukcji emisji CO<sub>2</sub> z produkcji cementu, redukcję wskaźnika klinkier/cement do poziomu 0,60 w 2050 r.

To wyzwanie wymaga przeanalizowania dostępności istniejących źródeł materiałów, którymi obecnie zastępuje się klinkier w cemencie, a także prowadzenie prac badawczych nad nowymi, alternatywnymi materiałami, które sprawdziłyby się co najmniej tak samo dobrze, jak materiały używane od kilkudziesięciu lat.

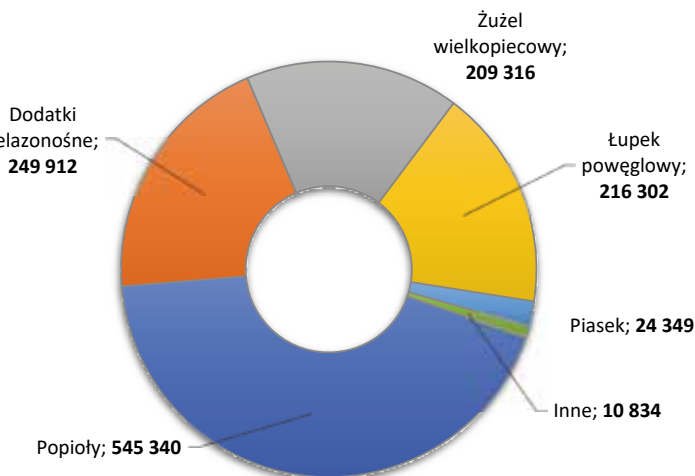
Wymagania wynikające z polityki klimatycznej spowodują, że w przyszłości popyt na materiały zastępujące klinkier w cemencie czy betonie będzie wzrastał a równolegle, wraz z dekarbonizacją sektora energetycznego i hutnictwa, podaż wtórnych surowców odpadowych z tych branż wykorzystywanych do produkcji cementu będzie spadać. Rosnące zapotrzebowanie ze strony sektora cementowego i przewidywana niższa podaż tych surowców stanowi od wielu lat główną motywację badań źródeł nieklinkierowych materiałów zapewniających właściwości porównywalne lub lepsze z eksploatowanymi źródłami przede wszystkim popiołu lotnego i żużla, odpowiednią reaktywność i korzystny wpływ na właściwości betonu.

Przy obecnej produkcji cementu w Polsce na poziomie 19 mln ton wykorzystanie odpadowych ma-

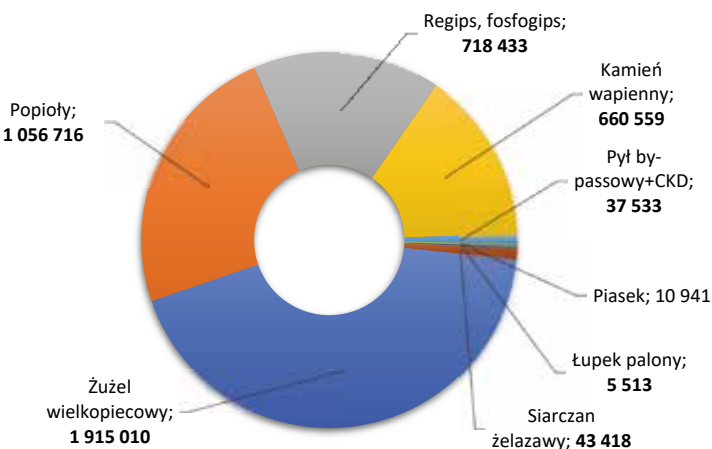


teriałów wynosi sumarycznie ponad 5,7 mln ton, z czego 4,5 mln ton stanowią dodatki do cementu. W dzisiejszych czasach, kierując się przekonaniem, że duża szybkość powstawania konstrukcji przekłada się na zyski finansowe, mieszanki betonowe zwykle zawierają wysoką zawartość bardzo reaktywnego i drobno zmielonego cementu, który intensywnie hydratyzuje z szybkim narastaniem wytrzymałości. Obecnie Polska jest jednym z kilku krajów europejskich, w którym zużycie CEM I jest na stosunkowo wysokim poziomie – w 2018 r. udział ten wyniósł 46%. Analiza roku 2019 i 9 miesięcy 2020 r. wskazuje spadek tego udziału do poziomu 41%. Interesujące jest, czy ta tenden-

Rys. 4. Zapotrzebowanie na nieklinkierowe składniki w cemencie przy rocznej produkcji cementu w Polsce na poziomie 19 mln ton

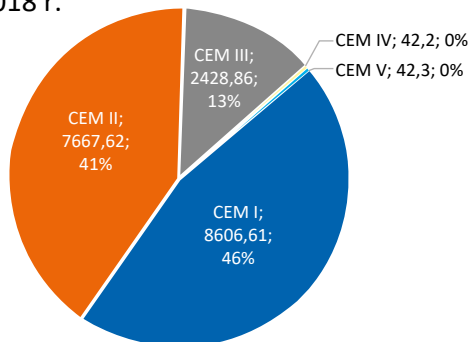


Rys. 5. Zużycie surowców odpadowych do produkcji klinkieru portlandzkiego w 2018 r.

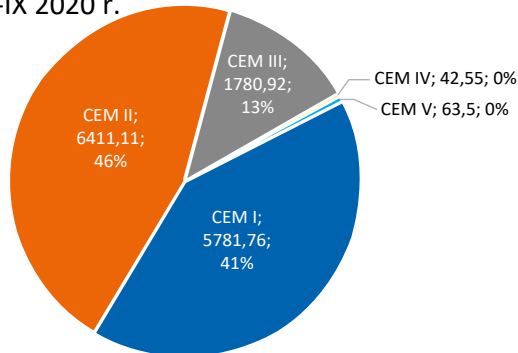


Rys.6. Zużycie dodatków do produkcji cementu w 2018 r.

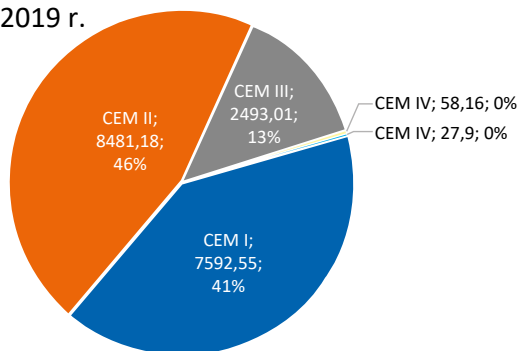
Polska 2018 r.



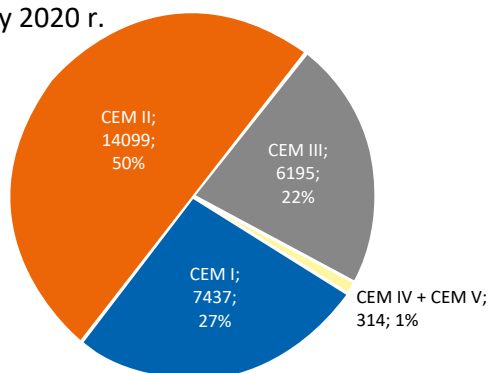
Polska I-IX 2020 r.



Polska 2019 r.



Niemcy 2020 r.



Rys. 7. Udział poszczególnych rodzajów cementu w rynku w Polsce i w Niemczech

cja będzie mieć trwały charakter, czy jest to tylko chwilowa zmiana na rynku. Warto zauważyć, że te wskaźniki są znacznie wyższe w porównaniu do udziału CEM I w roku 2020 na rynku niemieckim, który wyniósł 27%. Bardziej szczegółowa analiza udziałów w rynku poszczególnych rodzajów cementu w innych krajach europejskich (tab. 1) przynosi ciekawe obserwacje. W Austrii, we Włoszech, Grecji, Irlandii, Wlk. Brytanii i Niderlandach od wielu lat udział w rynku CEM I jest na stabilnym poziomie. Najbardziej spektakularna zmiana nastąpiła na rynku niemieckim, gdzie w ciągu 20 lat odnotowano ponad 50% spadek udziału CEM I w rynku, natomiast w Szwajcarii spadek ten był

niższy i wyniósł 27%, ale w efekcie udział CEM I jest na bardzo niskim poziomie 7%. Niewielkie obniżenie udziału CEM I w rynku można także odnotować w Belgii czy Francji. Polska i Hiszpania to kraje ze wzrostem udziału CEM I. Wielka Brytania jest szczególnym przypadkiem, gdzie od lat dodatki są zużywane nie na etapie produkcji cementu, ale w betoniarniach. Warto jeszcze zwrócić uwagę na Turcję, gdzie wprowadzono obowiązkowe stosowanie CEM I we wszystkich obiektach infrastruktury publicznej.

Konwencjonalne, nieklinkierowe składniki cementu (żuźle wielkopieczowe, popioły lotne) są używane od wielu dziesięcioleci w przemyśle cementowym

Tabela 1. Rynek cementu CEM I i cementów mieszanych w różnych krajach europejskich

Kraj	Okres	CEM I		Cementy mieszane (CEM II, CEM III, CEM IV)	
		Zmiana udziału w rynku	Aktualny udział	Zmiana udziału w rynku	Aktualny udział w rynku
Austria	2001-2017	bez zmian	12%	bez zmian	II: 86%
Belgia	1990-2017	-12%	26%	III: +12%	III: 67%
Francja	2012-2017	-7%	24%	II: +19%	II: 59%
Niemcy	1996-2017	-52%	28%	II: +36%; III: +12%	II: 46%; III: 25%
Grecja	2005-2012	bez zmian	5-10%	bez zmian	II: >50%; IV: 40%
Włochy	2010-2017	bez zmian	12%	bez zmian	II: 70%
Irlandia	2012-2017	bez zmian	27%	bez zmian	II: 73%
Niderlandy	2007-2017	bez zmian	33-36%	bez zmian	III: 60%
Polska	2010-2016	+11%	45%	II: -9%	II: 43%
Hiszpania	1992-2017	+10%	30%	II: -7%	II: 60%
Szwajcaria	2007-2017	-27%	7%	II: +26%	II: 90%
Turcja	1990-2018	+54%	58%	II: -64%	II: 30%
Wlk. Brytania	2008-2017	bez zmian	75%	bez zmian	25%

i zgromadzone dużą wiedzę na temat ich składu, wpływu na hydratację cementu i właściwości betonu. Można założyć, że zebrana wiedza i doświadczenie stanowią solidną podstawę do opracowania nowej generacji cementów niskoklinkierowych. Wobec zmieniających się uwarunkowań popytu i podaży, konieczne będzie również przeanalizowanie dotychczas niedocenianych, istniejących zasobów składników mieszanin popiołowo-żużlowych pod kątem ich wykorzystania w produkcji materiałów budowlanych, które występują np. w Polsce. W różnych ośrodkach naukowych na świecie trwa już od lat badania nad możliwością zastąpienia tradycyjnego klinkieru portlandzkiego innymi materiałami. Naturalnym wyborem materiałów do badań były przede wszystkim różnego rodzaju skalcynowane gliny, których obróbka termiczna odbywa się w znacznie niższej temperaturze niż wytwarzanie klinkieru (700-900°C). Gлина kaolinowa jest już dość dobrze przebadana pod tym względem materiałem. Najbardziej obiecującą kombinacją okazuje się cement z dodatkiem skalcynowanej gliny i wapienia, który zawiera 50% klinkieru, 30% kalcynowanej gliny, 15% wapienia i 5% gipsu. Stwierdzono w trakcie badań, że glina powinna zawierać odpowiednią ilość kaolinu – nie mniej niż 40% – gliny z mniejszą jego zawartością nie są tak reaktywne pucolanowo. Uzyskane wyniki wskazują, że beton wykonany na bazie takiego cementu może osiągnąć nawet lepsze właściwości mechaniczne i porównywalną przepuszczalność z betonem wytworzonym z cementu CEM I i betonem z cementu z dodatkiem 30% popiołu lotnego. Warto dodać, że badania właściwości pucolanowych dotyczą także innych glin (np. montmorylonitowych).

Polska jest krajem zasobnym w surowce ilaste, jednak analizując ten surowiec pod kątem jego wykorzystania w betonie, trzeba mieć na uwadze różne uwarunkowania – nie wszystkie gliny wykazują właściwości pucolanowe, należy uwzględnić zapotrzebowanie ze strony innych sektorów – tradycyjnie ceramicznego czy chemicznego. Dodatkowo, wydobywanie gliny także negatywnie oddziałuje na środowisko, o czym warto pamiętać w kontekście nowych wymagań w określonych w Europejskim Zielonym Ładzie, odnoszących się do ochrony bioróżnorodności.

Sam wapień, bez dodatku skalcynowanej gliny, ma także potencjał w zastępowaniu klinkieru w cemencie, stosowanym w zoptymalizowanych recepturach betonu. Produkcja cementów wysokowapiennych w cementowniach może być wdrożona stosunkowo szybko, co umożliwi nie tylko zgromadzone dotychczas wiedza na temat takich cementów i ich reaktywności, ale także istniejące normy na takie cemy.

Poszukując nowych materiałów o właściwościach wiążących, można także cofnąć się w przeszłość – aż do czasów rzymskich, kiedy cemynty wykonywano z tufów wulkanicznych. W historii betonu naturalne pucolany odgrywały ważną rolę od czasów starożytnych. Materiały wulkaniczne, w tym tufy, popioły, pumeksy, perlity i zeolity, były doskonałymi naturalnymi pucolanami, z wysoką zawartością amorficznej krzemionki i tlenku glinu. Obecnie obserwuje się większe zainteresowanie takimi

materiałami, np. w USA powstało w 2017 r. Stowarzyszenie Naturalnej Pucolany.

Powszechnie uważa się, że nieklinkierowe składniki cementu/betonu charakteryzują się niższą wytrzymałością wczesną, wynikającą ze słabszej początkowej reaktywności. Natomiast w dłuższym okresie korzystnie wpływają na mikrostrukturę betonu, jego wytrzymałość i ostatecznie trwałość, dzięki zachodzącej reakcji pucolanowej.

Przy opracowywaniu receptur nowych materiałów wyzwaniem może być brak udokumentowanej historii eksploatacji konstrukcji z ich użyciem, potwierdzających obserwacje wynikające z laboratoryjnych testów trwałości. Niemniej, rozsądnym wydaje się podejście, że cemynty mieszane zawierające nowe lub alternatywne składniki sprawdzą się co najmniej tak samo dobrze, jak materiały używane od kilkudziesięciu lat, jeżeli ich skład fazowy czy struktura porów będą się mieścić w określonych, ugruntowanych zakresach znanych dla konwencjonalnych materiałów.

Można założyć, że rozprzestrzenianie się technologii cyfrowych i ślad węglowy, jako istotny parametr oceny materiałów i usług, będą czynnikami, które w dużym stopniu zdeterminują rozwój budownictwa w obecnym stuleciu. Druk 3D z użyciem betonu umożliwi nowe funkcjonalności, których nie można osiągnąć za pomocą innych, istniejących materiałów, otwierając w ten sposób nowe zastosowania produktów, w których beton nie będzie miał konkurencji. Beton jest materiałem konstrukcyjnym, zużywanym w największych po wodzie ilościach na świecie i dlatego wszelkie zmiany i ulepszenia w jego zastosowaniu i funkcjonalności będą miały daleko idący wpływ na branżę budowlaną i światową gospodarkę.

**dr inż. Bożena Środa**  
**Stowarzyszenie Producentów Cementu**

#### Literatura

1. *Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. Cement and Concrete Research, 122. pp. 257-273. (2019).*
2. *Cements in the 21st Century: Challenges, Perspectives, and opportunities, Am Ceram Soc. 2017 July ; 100(7): 2746-2773.*
3. [www.cembureau.eu](http://www.cembureau.eu)
4. [www.gccassociation.org](http://www.gccassociation.org)
5. [www.polskicement.pl](http://www.polskicement.pl)

