

*Ewa Kapeluszna  
Łukasz Kotwica  
Waldemar Pichór  
Wiesława Nocuń-Wczelik*

# **Cementy powszechnego użytku z dodatkiem mielonego odpadu perlitu ekspandowanego**

COMMON CEMENTS WITH THE ADDITION OF GROUND WASTE  
EXPANDED PERLITE

## **Streszczenie**

Celem badań zaprezentowanych w artykule było sprawdzenie możliwości wykorzystania odpadu powstającego podczas produkcji perlitu ekspandowanego, jako głównego i drugorzędowego składnika cementów portlandzkich. Ponadto sprawdzono jego właściwości pucolanowe.

Wyniki doświadczeń pozwoliły na stwierdzenie, że zmielony perlit ekspandowany może być stosowany jako składnik cementów portlandzkich. Wykazuje on właściwości pucolanowe, powodujące zwiększenie wytrzymałości zapraw po 28 dniach twardnienia. Dodatek odpadowego perlitu zastępującego 20% cementu portlandzkiego nie powoduje większego wzrostu wodożądności cementu. Jednak dodatek 35% perlitu znacznie zwiększa wodożądność, opóźniając tym samym wiązanie cementu. Cement CEM I 42,5R, w którym zastąpiono 5% i 20% spoiwa mielonym perlitem ekspandowanym spełnia wymagania normy dla klasy 42,5R.

## **Abstract**

The effect of ground expanded perlite used as a component of common cements was examined, followed by the studies of chemical durability of cement – perlite mortars in the  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  and  $\text{MgSO}_4$  solutions.

---

*mgr inż. Ewa Kapeluszna – AGH-Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Katedra Technologii Materiałów Budowlanych*

*dr inż. Łukasz Kotwica – AGH-Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Katedra Technologii Materiałów Budowlanych*

*dr inż. Waldemar Pichór – AGH-Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Katedra Technologii Materiałów Budowlanych*

*prof. dr hab. inż. Wiesława Nocuń-Wczelik – AGH-Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Katedra Technologii Materiałów Budowlanych*

It has been found that expanded perlite exhibits pozzolanic properties and brings about the strength increase of mortars after 28-day curing. The 20% addition of perlite has no influence on water demand. However, in the case of 35% addition of expanded perlite the water demand significantly increases. The binders in which 5% and 20% of cement was replaced by ground expanded perlite, complied with the requirements of class 42.5 cement.

## 1. Wprowadzenie

Naturalnie występujący perlit jest szkłem wulkanicznym zawierającym w swoim składzie ok. 5% masowych wody. W wysokiej temperaturze ciśnienie pary wodnej powoduje ekspansję szkła, co oznacza wzrost objętości i zmianę mikrostruktury, w wyniku czego powstaje perlit ekspandowany.

Perlit ekspandowany stosuje się w technologii materiałów budowlanych głównie, jako lekki wypełniacz, polepszający właściwości termoizolacyjne. W procesie produkcji, powstają duże ilości odpadowego perlitu, który jest materiałem o drobnym uziarnieniu i bardzo małej gęstości nasypowej (50-150 kg/m<sup>3</sup>). Stanowi on problem dla producentów, utrudniając transport i składowanie, a także zwiększając zapylenie.

Materiały pucolanowe stosowane w przemyśle cementowym, do których należą min. popioły lotne, pył krzemionkowy oraz pucolany naturalne i wypalane, wpływają korzystnie na trwałość i właściwości mechaniczne zapraw. Spowodowane jest to poprawą struktury porów, powstającą fazą C-S-H w wyniku reakcji puculanowej. Perlit ekspandowany jest materiałem, który składem chemicznym przypomina powszechnie znane pucolany. Stanowi fazę szklaną o dużej zawartości krzemionki, wynoszącej ok. 70% i tlenku glinu ok. 10%. Wykazano, że jest to pucolana o potencjalnej dużej reaktywności, a więc atrakcyjna z punktu widzenia technologii materiałów wiążących [1–6].

## 2. Część doświadczalna

Badania dotyczą możliwości wykorzystania odpadu powstającego podczas produkcji perlitu ekspandowanego, jako głównego i drugorzędnego składnika cementów portlandzkich. Sprawdzone wpływ niniejszego materiału na normowe właściwości cementów. Ponadto zbadano właściwości puculanowe perlitu poprzez wyznaczenie zawartości wodorotlenku wapnia oraz wody związanej chemicznie.

### 2.1. Materiały

Surowce wykorzystane w trakcie realizacji badań:

a) Cement CEM I 42,5R

Cement portlandzki stosowany w badaniach, jako cement odniesienia to CEM I 42,5R. W tabeli 1 przedstawiono jego skład chemiczny.

Tabela 1. Skład chemiczny cementu odniesienia CEM I 42,5R

CEM I 42,5 R	
Na <sub>2</sub> O	0,4
MgO	1,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,6
SiO <sub>2</sub>	19,4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,3
SO <sub>3</sub>	5,2
K <sub>2</sub> O	1,2
CaO	61,2
TiO <sub>2</sub>	0,4

Tabela 1. Cd. Skład chemiczny cementu odniesienia CEM I 42,5R

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,3
ZnO	0,1
Cl	0,1
SUMA:	99,7

Za pomocą wzorów Bogue'a wyznaczono skład fazowy cementu CEM I 42,5R. Wzory umożliwiające wyznaczenie zawartości procentowych poszczególnych faz wchodzących w skład cementu przedstawiają się następująco:

- %C<sub>3</sub>S = 4,07(%CaO) - 7,60(%SiO<sub>2</sub>) - 6,72(%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) - 1,43(%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) - 2,85(%SO<sub>3</sub>)
- %β-C<sub>2</sub>S = 2,87(%SiO<sub>2</sub>) - 0,75(%C<sub>3</sub>S)
- %C<sub>3</sub>A = 2,65(%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) - 1,69(%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
- %C<sub>4</sub>AF = 3,04(%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

Tabela 2. Skład fazowy CEM I 42,5R wyznaczony za pomocą wzorów Bogue'a

Skład fazowy wg wzorów Bogue'a	
C <sub>3</sub> S	52,2
β- C <sub>2</sub> S	16,6
C <sub>3</sub> A	11,6
C <sub>4</sub> AF	10,6

Należy skomentować, że jest to przybliżony skład fazowy. W rzeczywistości przy wykonaniu badania analizy ilościowej składu fazowego mogą wystąpić niewielkie różnice w udziałach procentowych faz tworzących cement. Wynika to min. z faktu, iż w cemencie poza głównymi składnikami występują, w niewielkiej ilości, inne substancje takie jak np. siarczany wapnia, sodu, potasu czy też wolne wapno.

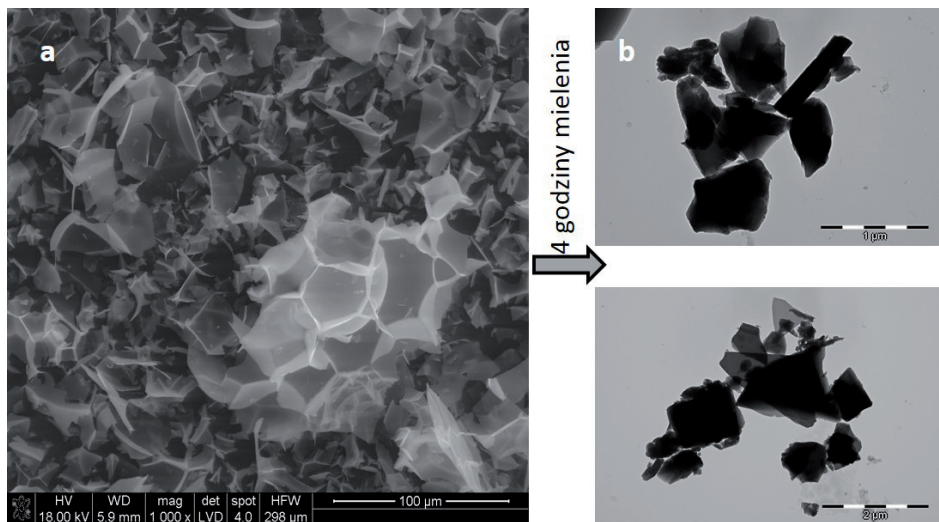
#### b) Odpad powstający podczas produkcji perlitu ekspandowanego

Ze względu na swoją bardzo małą gęstość nasypową odpad wymagał odpowiedniego przygotowania. Polegało ono na wstępnym prasowaniu materiału w cylindrze o średnicy 20 mm przykładając siłę równą 200 kN. Wykonano ten zabieg w celu umożliwienia dozowania odpowiedniej ilości materiału, który po prasowaniu posiadał większą gęstość nasypową. Następnie, sprasowany odpad mielono przez 4 godziny w laboratoryjnym młynie kulowym. Tak przygotowany materiał został przeznaczony do badań. Na rysunku 1 przedstawiono różnice w mikrostrukturze odpadu przed i po obróbce.

Aby scharakteryzować mielony odpad zbadano zawartość wilgoci którą określa się, jako stratę masy reprezentatywnej próbki perlitu po wysuszeniu w temperaturze 105±110°C, w odniesieniu do stałej masy i wyrażonej jako procent masy suchej próbki. Ponadto wyznaczono straty prażenia i gęstość metodą piknometryczną.

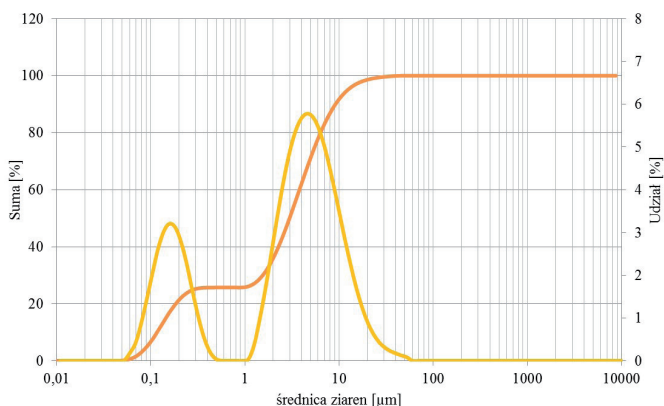
Tabela 3. Parametry charakteryzujące mielony, odpadowy perlit ekspandowany

Parametr	Wartość
Wilgotność [% wag.]	0,5
Straty prażenia [% wag.]	1,7
Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	2,4



Rys. 1. Mikrostruktura odpadowego perlitu ekspandowanego obserwowana za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego SEM – (a). Mikrostruktura odpadowego perlitu po 4 godzinach mielenia w młynie kulowym obserwowana na pomocą transmisyjnego mikroskopu elektronowego TEM – (b)

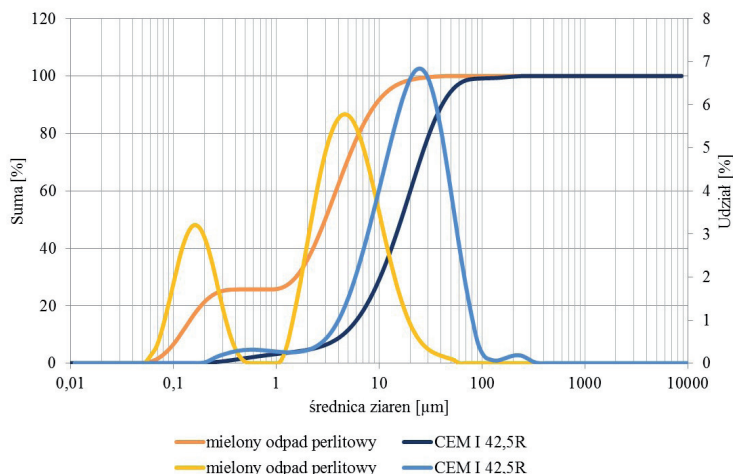
Przeprowadzono również badanie na granulometrze laserowym MALVERN 2000 w celu sprawdzenia rozkładu ziarnowego mielonego odpadu perlitowego. Wynik badania przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Krzywa uziarnienia mielonego, odpadowego perlitu ekspandowanego

Na podstawie wykresu na rysunku 2 można zaobserwować, że mielony odpad perlitu ekspandowanego zawiera ok. 25% ziaren o wymiarze  $0,06 \div 1,0 \mu\text{m}$  oraz 75% ziaren zawierających się w przedziale  $1,0 \div 60 \mu\text{m}$ .

Wykres na rysunku 3 przedstawia porównanie rozkładu ziarnowego mielonego odpadu oraz cementu CEM I 42,5R. Badanie wykonano na tym samym aparacie.



Rys. 3. Krzywe uziarnienia mielonego, odpadowego perlitu ekspandowanego oraz cementu portlandzkiego CEM I 42,5R

Można stwierdzić, że badany perlit ekspandowany jest to materiał, którego wymiary ziaren różnią się od wymiarów typowego cementu portlandzkiego. Zasadnicza różnica polega na tym, iż posiada on większy udział drobniejszych ziaren o wymiarze  $0,06 \div 1,0 \mu\text{m}$ . Mielony perlit zawiera ok. 60 punktów procentowych więcej ziaren o wymiarze średnicy poniżej  $10 \mu\text{m}$ .

c) Piasek normowy

d) Woda wodociągowa

Przygotowano cementy z dodatkiem mielonego perlitu ekspandowanego w ilości 5, 20 oraz 35%. Spoiwo zawierające 5% odpadowego perlitu odpowiada normowemu cementowi CEM I, spoiwo z 20%-owym dodatkiem odpowiada CEM II/A, natomiast spoiwo CEM II/B zawiera 35% odpadu perlitowego. Dzięki temu możliwe było porównanie właściwości przemysłowego cementu normowego z właściwościami cementów z dodatkiem mielonego odpadu perlitu ekspandowanego. W badaniach stosowano cement portlandzki CEM I 42,5R o składzie chemicznym zawierającym ok. 61% CaO, 19% SiO<sub>2</sub>, 7% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i 2% MgO i 5% SO<sub>3</sub>.

Ze względu na bardzo małą gęstość nasypową odpad powstający w produkcji perlitu ekspandowanego po wstępnym sprasowaniu mielono przez 4 godziny. Wypadkowy materiał poddany badaniom to perlit o morfologii ziaren przypominających cienkie blaszki o dużym rozwinięciu powierzchni. Wielkość ziaren perlitu zawiera się w przedziale pomiędzy 60 nm a 60 µm. Oznaczono skład chemiczny, gęstość metodą piknometryczną oraz wilgotność i straty prażenia materiału.

Tabela 4. Skład chemiczny odpadu z perlitu ekspandowanego

Składnik	Zawartość %
Straty prażenia	0,6
SiO <sub>2</sub>	76,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,5
TiO <sub>2</sub>	0,4
CaO	0,5
MgO	0,7
Na <sub>2</sub> O	3,1
K <sub>2</sub> O	4,5

Tabela 5. Właściwości mielonego odpadu perlitu ekspandowanego

Właściwość	Wartość
Wilgotność [%]	0,5
Straty prażenia [%]	1,7
Gęstość, g/cm <sup>3</sup>	2,4

## 2.2. Przygotowanie cementów

Cementy przygotowano poprzez zmieszanie, w odpowiednich proporcjach, odpadowego perlitu z cementem portlandzkim oraz homogenizację w laboratoryjnym młynku rolkowym (skład – tabela 6).

Tabela 6. Składy cementów poddanych badaniu

Cement	Zawartość składników, % masowe	
	CEM I 42,5R	Perlit
CEM I	100	-
CEM 5%	95	5
CEM 20%	80	20
CEM 35%	65	35

## 2.2. Metody

Skład chemiczny wyznaczono za pomocą spektrometru fluorescencyjnego – PANalytical (WD-XRF) Axios mAX 4 kW X. Oznaczono gęstość objętościową metodą piknometryczną (PN-EN 1097-7:2008) oraz powierzchnię właściwą metodą Blaine’a (PN-EN 196-6:2011) uzyskanych cementów. Szybkość reakcji cementów z wodą oceniano na podstawie pomiarów ciepła hydratacji w mikrokalorymetrze różnicowym nieizotermiczno-nieadiabatycznym, a konsystencję, wodożądność oraz czas wiązania zgonie z normą PN-EN 196-3:2011. Zawartość wodorotlenku wapnia w zaczynach po pewnym czasie hydratacji wyznaczono za pomocą DTA/TG (aparatus DTA/TG Netzsch). Ilość wody związanej chemicznie wyznaczono na podstawie następującej metodyki: Zaczyny zawierające cementy

z rónną zawartością perlitu o stosunku w/c równym 0,5 po odpowiednim okresie czasu zostały wysuszone do stałej masy w eksykatorze próżniowym. Następnie próbki pozbawione wody związanej fizycznie prażono przez 2 godziny w 1000°C. Zawartość wody związanej chemicznie to strata masy związana z wodą zawartą w hydratách C-(A)-S-H, a także straty związanej z wodorotlenkiem wapnia i węglanem wapnia. Wytrzymałość po 2, 7 i 28 dniach twardnienia mierzono zgodnie z normą PN-EN 196-1:2006. Przeprowadzono także obserwacje mikrostruktury stwardniałych zapraw pod skaningowym mikroskopem elektronowym.

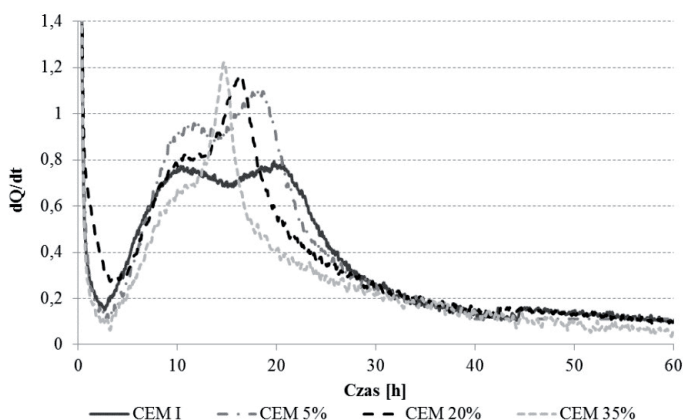
### 3. Wyniki badań

Jak można było oczekiwać dodatek perlitu spowodował spadek gęstości cementu, bowiem gęstość perlitu równa 2,4 g/cm<sup>3</sup>, jest o około 30% mniejsza w porównaniu do gęstości cementu (tabela 7). Natomiast zwiększyła się powierzchnia właściwa w związku z charakterystycznym blaszkowatym pokrojem i wielkością ziaren perlitu odpowiedzialnych za dużą powierzchnię właściwą.

Tablica 7. Gęstość i powierzchnia właściwa cementów

Cement	Gęstość g/cm <sup>3</sup>	Powierzchnia cm <sup>2</sup> /g
CEM I	3,2	3740
CEM5%	3,0	4010
CEM20%	2,9	5240
CEM35%	2,8	5610

Pomiary ciepła hydratacji cementów wykonywano przy stosunku w/c = 0,5.

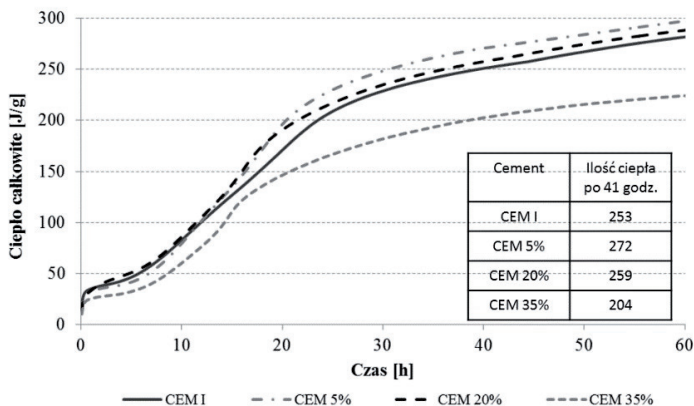


Rys. 4. Krzywe kalorymetryczne cementu bez i z dodatkiem odpadu perlitowego

Na podstawie pomiarów mikrokalorymetrycznych przedstawionych na rysunkach 1 i 2 można stwierdzić, że mielony odpad perlitowy przyspiesza proces hydratacji cementu

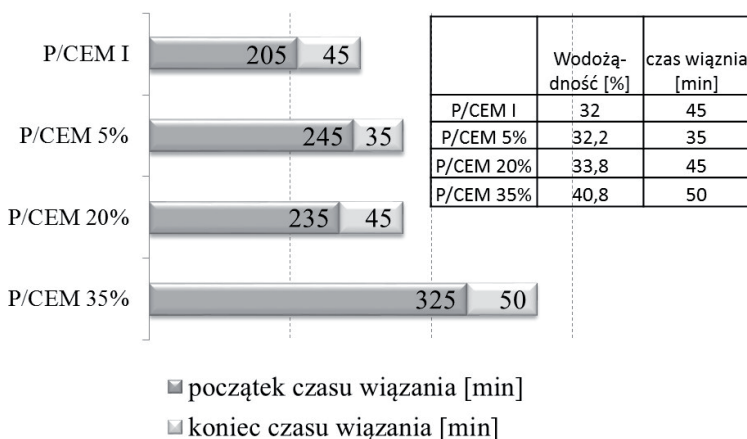


już w początkowym stadium pomiędzy 12 a 22 godziną twardnienia. Całkowite ciepło twardnienia po 41 godzinach jest większe w przypadku cementów zawierających 5% i 20% odpadowego perlitu. Natomiast w przypadku największego dodatku perlitu [CEM 35%] ciepło hydratacji ulega zmniejszeniu, a okres indukcji nieznacznie wydłużeniu.



Rys. 5. Całkowita ilość wydzielenego ciepła cementów

Wyniki oznaczeń czasu wiązania przedstawiono na rysunku 6. Równocześnie stwierdzono, że dodatek odpadowego perlitu ekspandowanego powoduje zwiększenie wodozadržności cementu. Dodatek 5% i 20% perlitu ma mały wpływ na wodozadržność, natomiast zastąpienie 35% cementu portlandzkiego perlitem powoduje niekorzystne zwiększenie o 25%. Oznacza to w praktyce, że dodatek perlitu nie przekraczający 20% masowych nie wpłynie niekorzystnie na konsystencję zaprawy lub mieszanki betonowej, natomiast 35% pogorszy ją.

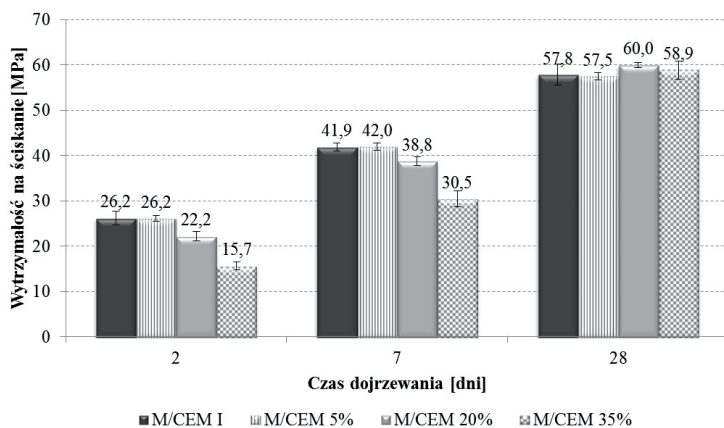


Rys. 6. Czas wiązania i wodozadržność cementów

Wyniki przedstawione na wykresie (rysunek 6) potwierdzają wpływ mielonego perlitu ekspandowanego na hydratację cementu. Czas wiązania jest pochodną współczynnika w/c. Perlit jako dodatek wodożądny powoduje wzrost w/c co bezpośrednio przekłada się na opóźnienie wiązania. Im większy dodatek perlitu tym większe wydłużenie czasu wiązania i tym późniejszy początek wiązania. Najdłużej wiązał cement zawierający 35% perlitu ekspandowanego. Można jednak stwierdzić, że wszystkie cementy w których jako składnik zastosowano perlit spełniają wymagania normy PN-EN 197-1:2012 dotyczące czasu wiązania.

W celu sprawdzenia wpływu mielonego odpadu perlitowego na właściwości mechaniczne cementu, wykonano badania wytrzymałości na zginanie i ściskanie. Zostały one przeprowadzone, zgodnie z normą PN-EN 196-1:2006.

Na rysunku 7 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie w funkcji czasu dojrzewania i zawartości perlitu.



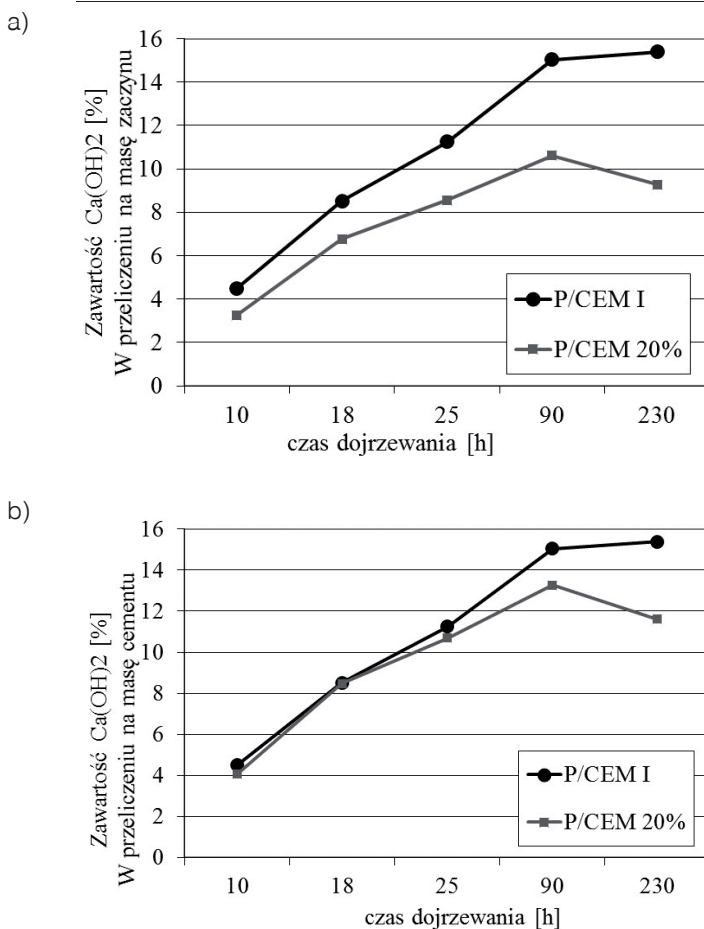
Rys. 7. Wytrzymałość na ściskanie zapraw

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie pokazują, że dodatek 5% masowych perlitu nie powoduje zmian wytrzymałości zarówno po 2, 7 jak i 28 dniach dojrzewania w porównaniu z cementem bez dodatku. Natomiast większy dodatek odpadu perlitowego spowodował spadek wytrzymałości na ściskanie po 2 i 7 dniach dojrzewania. W przypadku zaprawy z CEM 35% wytrzymałość po 2 i 7 dniach twardnienia jest o ok. 30% mniejsza procentowo mniej więcej o ilość dodatku. Natomiast co najważniejsze z punktu widzenia norm europejskich, tak w przypadku CEM 20% jak i CEM 35% wystąpiła poprawa wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania zapraw. Ten wzrost wytrzymałości był niewątpliwie spowodowany reakcją pucolanową perlitu i zwiększeniem zawartości fazy C-S-H.

Równocześnie można stwierdzić, że cementy CEM 5% i CEM 20% spełniają wymagania normy PN-EN 197-1:2012 dla klasy wytrzymałości 42,5R.

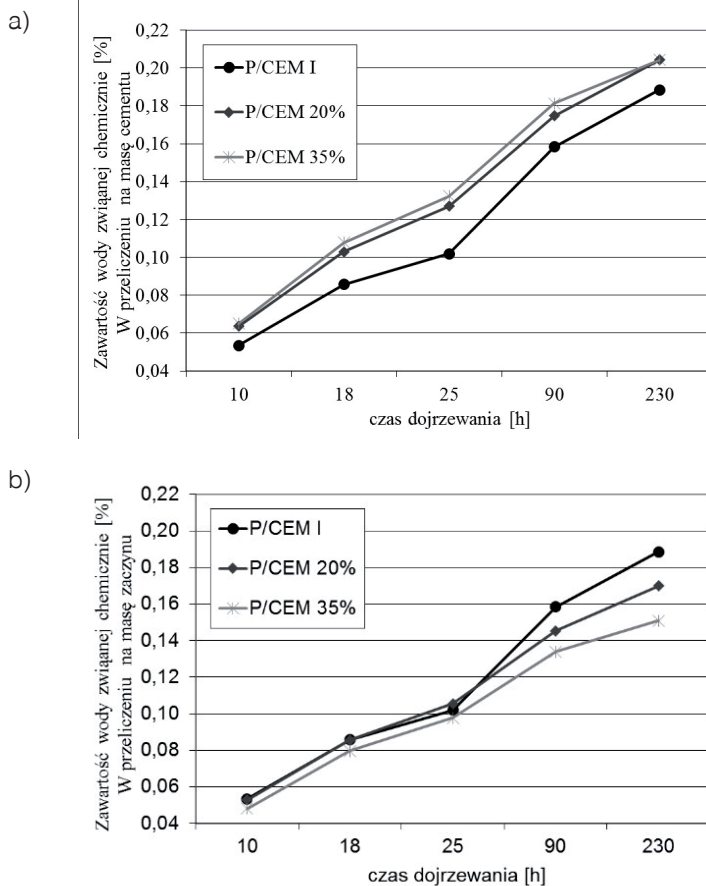
Właściwości pucolanowe rozumiane są jako zdolność do reakcji aktywnych tlenków krzemu i glinu, wchodzących w skład pucolanu, z jonami wapniowymi pochodzącymi z portlandytu. W wyniku reakcji powstają dodatkowe ilości C-(A)-S-H, a wymiernym wynikiem jest zwiększenie wytrzymałości na ściskanie poprzez zmiany w mikrostrukturze

zapraw. Wyniki odzwierciedlające zmieniającą się w czasie ilość wodorotlenku wapnia oraz uwodnionych hydratów C-(A)-S-H przedstawiono na rysunkach 8 i 9.



Rys. 8. Zawartość portlandytu w funkcji czasu dla zaczynu z cementu referencyjnego oraz zaczynu z cementu CEM 20%

Zmiana zawartości  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  w funkcji czasu jest bardzo ważnym czynnikiem mówiącym o postępie hydratacji, jak również o postępie reakcji pucolanowej. Wykresy na rysunku 8 przedstawiają zawartość portlandytu w odniesieniu do masy zaczynu oraz w odniesieniu do masy samego cementu w zaczynie. Do 25 godzin hydratacji w obu próbkach pojawia się tyle samo wodorotlenku wapnia. Różnice uwydatniają się w późniejszym okresie hydratacji, gdzie zawartość wodorotlenku maleje w czasie dla zaczynu modyfikowanego perlitem, w porównaniu do zaczynu referencyjnego. Po 230 godzinach hydratacji zawartość  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  jest o ok. 6 punktów procentowych mniejsza dla zaczynu z perlitem w porównaniu do zaczynu normowego. Otrzymane rezultaty wskazują na dobre właściwości pucolanowe mielonego odpadu perlitu ekspandowanego.

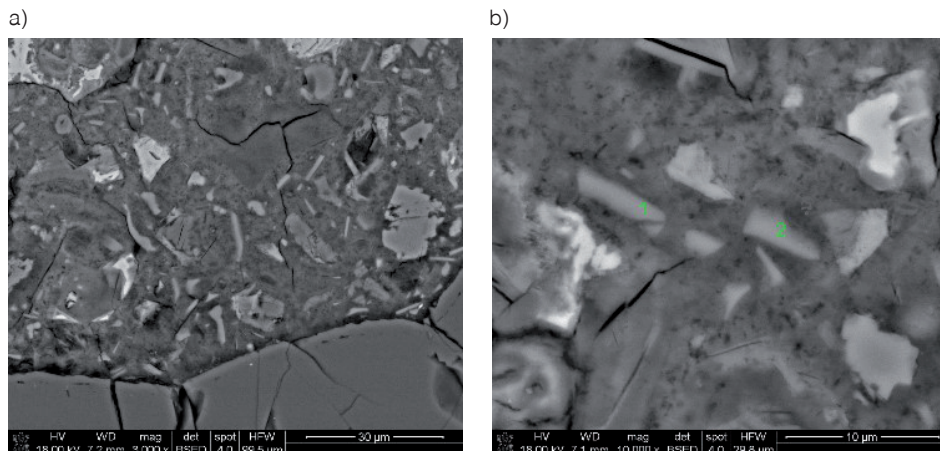


Rys. 9. Zawartość wody nieodparowalnej w funkcji czasu dla zaczynów z cementów CEM I, CEM 20%, CEM 35%

Rysunek 9 przedstawia zawartość wody związanej chemicznie w zaczynach zawierających różne ilości perlitu ekspandowanego. Można stwierdzić, że przebieg hydratacji dzieli się na dwa etapy. W pierwszym etapie do 24 godzin hydratacji zawartość wody związanej chemicznie jest stała dla wszystkich rodzajów cementów. Różnice uwydatniają się w późniejszych okresach czasu, co oznacza wpływ reakcji pucolanowej. Zwiększenie zawartości perlitu powoduje zmniejszenie zawartości wody związanej chemicznie. Należy podkreślić, że woda związana chemicznie jest pochodną zawartości produktów hydratacji cementu, a zaczyny analizowane w badaniach posiadają różną zawartość tego spoiwa. Z tego powodu przeliczono masę wody związanej chemicznie na masę czystego cementu.

Analizując wyniki (rys. 9) można stwierdzić, że dodatek perlitu powoduje wzrost wody związanej chemicznie wyrażonej jako procent masy czystego cementu zawartego w spoiwie. Fakt ten wskazuje na czynny udział perlitu ekspandowego w procesie hydratacji powodując powstanie dodatkowych ilości C-(A)-S-H.

Obserwacje mikrostruktury zaprawy z cementu CEM 20% za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (rys. 10) pozwoliły na stwierdzenie, że perlit jest składnikiem, który bierze udział w procesie hydratacji. Świadczy o tym brak wyraźnych granic pomiędzy cząstkami perlitu a fazą C-S-H, co wskazuje na powstawanie produktów hydratacji w formie warstewek pokrywających powierzchnie perlitu.



Rys. 10. Mikrostruktura zaprawy z cementu CEM 20%, dojrzewająca 180 dni w wodzie w 20°C; a – cząstki perlitu równomiernie rozłożone w matrycy cementowej; b – blaszkowate cząstki perlitu, na przykład 1 i 2

## 4. Podsumowanie

Badania wykazały, że zmielony odpad z produkcji perlitu ekspandowanego może stanowić składnik cementów portlandzkich. Wykazuje on właściwości pucolanowe, powodując zwiększenie wytrzymałości zapraw po 28 dniach twardnienia. Badania zawartości wodorotlenku wapnia w czasie również potwierdziły czynny udział perlitu w reakcji pucolanowej. Po ok. 10 dniach hydratacji zawartość wodorotlenku wapnia jest o ok. 4 punkty procentowe mniejsza w zaczynie zawierającym perlit w porównaniu do zaczynu referencyjnego z cementem CEM I.

Dodatek odpadowego perlitu zastępującego 20% cementu portlandzkiego nie powoduje większego wzrostu wodozadržności cementu. Jednak w przypadku największego dozowania tj. 35%, znacznie ją zwiększa, co wymaga stosowania superplastyfikatora. Perlit opóźnia wiązanie cementu, przy czym efekt ten rośnie wraz ze zwiększeniem jego zawartości w spoiwie.

Najważniejszym z punktu widzenia norm europejskich jest fakt, iż cement CEM I 42,5R, w którym zastąpiono 5% i 20% spoiwa mielonym perlitem ekspandowanym spełnia wymagania normy PN-EN 197-1 dla klasy 42,5R. Szczególnie w przypadku 20% dodatku, jest to wynik bardzo obiecujący.

Praca finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, projekt nr. PBS I 177206

## Literatura

- [1] Kotwica, Łukasz, Waldemar Pichór, and Wiesława Nocuń-Wczelik. „Study of pozzolanic action of ground waste expanded perlite by means of thermal methods.” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 123.1 (2016): 607–613.
- [2] Kapeluszna, E., et al. „Zastosowanie odpadu z produkcji perlitu ekspandowanego, jako dodatku mineralnego do cementu portlandzkiego.” *Cement Wapno Beton* 20 (2015).
- [3] M. Lanzón Torres, P.A. García-Ruiz, Lightweight pozzolanic materials used in mortars: Evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption, *Cem. Concr. Comp.* **31**, 114–119 (2009).
- [4] Sinan Turhan Erdoğan, Asli Ünsal Sağlık, Early-age activation of cement pastes and mortars containing ground perlite as a pozzolan, *Cem. Concr. Comp.* **38**, 29–39 (2013)
- [5] T.K. Erdem, C. Meral, M. Tokyay, T.Y. Erdoğan, Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements, *Cem. Concr. Comp.* **29**, 13–21 (2007).
- [6] Pichór, W., Barna, M., Kapeluszna, E., Łagosz, A., & Kotwica, E. (2014). The Influence of Waste Expanded Perlite on Chemical Durability of Mortars. *Solid State Phenomena*, 227.