

Cementy specjalne – nowe kryteria klasyfikacji, wymagań i oceny zgodności

W niniejszym artykule omówiono zagadnienia normalizacji cementów specjalnych, uwzględniając zasady klasyfikacji oraz wymagania będące przedmiotem oceny zgodności cech charakterystycznych wg norm europejskich PN-EN 197-1 i PN-EN 14216 oraz normy krajowej PN-B-19707:2013 „Cement. Cement specjalny. Skład, wymagania i kryteria zgodności”. Uwagę zwrócono na zakres normy PN-B-19707, która uwzględnia nowe rodzaje cementów specjalnych wieloskładnikowych odpornych na siarczany HSR i niskoalkalicznych NA. Przedstawiono rezultaty badań cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM III/A,B-M (S,V) oraz cementów wieloskładnikowych CEM V/A,B(S,V), w zakresie wymagań stawianych dla cementów specjalnych HSR i NA. Zebrane dane stanowią podstawę dokumentacji uzasadniającej wprowadzenie tych cementów do krajowej normy PN-B-19707:2013 na cementy specjalne.

1. Wprowadzenie

Zgodnie z tworzonym systemem zharmonizowanych norm europejskich hEN, z dużej grupy cementów powszechnego użytku wyróżnia się w normie PN-EN 197-1 [1] cementy specjalne, które oprócz podstawowych normowych cech charakterystycznych spełniają dodatkowo wymagania umożliwiające projektowanie i wykonywanie konstrukcji betonowych o dużej trwałości dla warunków oddziaływań destrukcyjnych (głównie różne rodzaje agresji chemicznej). Przedmiotem klasyfikacji i oceny zgodności są cementy specjalne o niskim cieple hydratacji LH, cementy odporne na korozję siarczanową SR, zalecane do stosowania w klasie ekspozycji XA2 i XA3 według wymagań normy PN-EN 206-1:2003[2]. Norma PN-EN 197-1 nie obejmuje swoim zakresem cementów niskoalkalicznych NA. Cementy o niskim cieple hydratacji LH umożliwiają projektowanie i wykonywanie konstrukcji maszynowych i wielkogabarytowych o małej egzotermii twardnienia, bez obawy powstania naprężeń termicznych wywołujących spękania i destrukcję betonu. Cementy odporne na siarczany SR i cementy niskoalkaliczne NA umożliwiają projektowanie i wykonywanie konstrukcji trwałych w warunkach agresji siarczanowej i odpornych na oddziaływanie korozji alkalicznej w betonie przy stosowaniu kruszyw reaktywnych.

Według normy PN-EN 197-1, każdy cement powszechnego użytku, spełniając postawione wymagania dotyczące wartości ciepła hydratacji, może być certyfikowany jako cement specjalny o niskim cieple hydratacji LH dla systemu oceny zgodności 1+ wyrobu wolnorynkowego ze znakiem CE. Dodatkowo, norma PN-EN 14216 wyróżnia grupę cementów o bardzo niskim cieple hydratacji VLH [3]. Ten rodzaj cementu jest dostępny tylko w klasie wytrzymałościowej 22,5. Zalecany jest do wykonywania dużych masywów betonowych, np. w hydrotechnice.

Z grupy 27 rodzajów cementów powszechnego użytku tylko nieliczne klasyfikowane są w normie PN-EN 197-1:2012, jako cementy specjalne odporne na siarczany SR. Wybraną grupę cementów SR stanowią cement portlandzki CEM I, hutniczy CEM III/B,C oraz pucolanowy CEM IV/A,B. Cementy uznawane w krajach członkowskich CEN za odporne na siarczany i niskoalkaliczne, nieobjęte zakresem normy europejskiej PN-EN 197-1, są przedmiotem klasyfikacji i wymagań norm krajowych. W poszczególnych krajach zakres normalizacji cementów odpornych na siarczany i o niskiej zawartości aktywnych alkaliów NA jest zróżnicowany.

Znowelizowana w 2013 r. krajowa norma na cementy specjalne PN-B-19707:2013 [5], rozszerza zakres klasyfikacji cementów specjalnych o cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/A,B-M (S,V) i cementy wieloskładnikowe CEM V/A,B (S,V). Celowość włączenia do zakresu normy PN-B-19707 nowych cementów wieloskładnikowych CEM II i CEM V należy widzieć w świetle bardzo obszernych danych literaturowych i doświadczeń związanych z ich wykorzystaniem w technologii betonu. Zależność ograniczenia skutków korozji siarczanowej i alkalicznej betonu w funkcji zawartości popiołu lotnego krzemionkowego i granulowanego żużla wielkopieczowego w cementach CEM II i CEM V została potwierdzona wieloletnimi badaniami prowadzonymi w ICI MB, jak też w innych krajowych ośrodkach naukowo-badawczych [6-10]. Wyniki tych badań uwzględnione w pracach Komitetu Technicznego KT 196 Polskiego Komitetu Normalizacyjnego do spraw cementu i wapna były przesłanką do rozszerzenia normy PN-B-19707:2013 [5] o nowe rodzaje cementów specjalnych wieloskładnikowych.

W niniejszym artykule przedstawiono kryteria klasyfikacji zawarte w znowelizowanej normie krajowej PN-B-19707:2013 [5] na cementy odporne na siarczany HSR oraz cementy niskoalkaliczne NA. Podano wyniki badań cementów popiołowo-żużlowych wieloskładnikowych CEM II/A,B i CEM V/A,B w zakresie właściwości normowych i kształtujących odporność tego rodzaju cementów na siarczany i reakcję alkaliczną ASR. Zamieszczone w artykule wyniki są kompilacją rezultatów prowadzonych prac i programów badawczych uzasadniających wprowadzenie cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A,B-M(S,V) i cementów wieloskładnikowych CEM V/A,B jako cementów specjalnych do normy krajowej PN-B-19707:2013 [11-15]. Artykuł uzupełniono o charakterystykę wybranych, aktualnie produkowanych cementów specjalnych odpornych na siarczany (SR i HSR) o niskim cieple hydratacji LH. Skala produkcji tych cementów w kraju jest bardzo duża i szacowana jest na ok. 40% rynku krajowego (dane Stowarzyszenia Producentów Cementu). Przedstawione w niniejszym artykule rezultaty badań będą prezentowane na XIX Konferencji Naukowo-

-Technicznej „Trwałość budowli i ochrona przed korozją” 2014 [16-17]. Wyniki badań, które dokumentują możliwość skutecznego ograniczenia destrukcji siarczanowej i alkalicznej, prezentowane były również m.in. w materiałach konferencji Kontra 2002 [18].

2. Klasyfikacja i wymagania dla cementów specjalnych według norm europejskich

Zakres klasyfikacji i wymagania stawiane cementom specjalnym w aktualnych normach PN-EN zestawiono w tablicach 1 i 2. W tablicy 1 podano wymagania dla cementu o niskim cieple hydratacji LH wg normy PN-EN 197-1 [1] oraz wymagania dla cementów o bardzo niskim cieple hydratacji VLH, objętych zakresem normy europejskiej PN-EN 14216 [3].

W tablicy 2 podano klasyfikację i wymagania dla cementów odpornych na siarczany SR wyszczególnionych w normie europejskiej PN-EN 197-1 [1].

3. Kryteria klasyfikacji i wymagania stawiane cementem specjalnym w normie krajowej PN-B-197-07:2013

Przedmiotem klasyfikacji i wymagań w normie krajowej PN-B-19707 [5] są cementy specjalne odporne na siarczany HSR oraz cementy specjalne niskoalkaliczne NA.

Zakres klasyfikacji cementów HSR podano w tablicy 3, natomiast klasyfikację i wymagania dla cementów niskoalkalicznych NA podano w tablicy 4. Podstawą klasyfikacji cementów HSR i NA jest zawartość składnika pucolanowego i hydraulicznego w cemencie: popiołu lotnego krzemionkowego V, granulowanego żużla wielkopiecowego S lub mieszaniny tych składników, kształtujących odporność cementu na korozję siarczanową i reakcję ASR. Należy zwrócić uwagę, że podane w tablicy 4 wymagania dotyczące maksymalnej zawartości alkaliów w cementach w przeliczeniu na $\text{Na}_2\text{O}^{\text{eq}}$ są wynikiem dużej zawartości związków sodu i potasu, szczególnie w popiołach lotnych krzemionkowych. Jednakże bardzo mała wymywalność alkaliów, zarówno z popiołów lotnych, jak i granulowanego żużla wielkopiecowego, gwarantuje, że zawartość alkaliów czynnych (dostępnych w porach betonu do przebiegu reakcji ASR) w każdym normowanym cemencie niskoalkalicznym NA popiołowo-żużlowym jest poniżej $\leq 0,6\%$ (tablica 4), co zgodnie z literaturą przedmiotu umożliwia projektowanie i wykonywanie konstrukcji odpornych na korozję alkaliczną w betonie [9, 19].

4. Wyniki badań nowych rodzajów cementów specjalnych w normie krajowej PN-B 19707

Badano odporność na siarczany i reakcję alkalia-kruszywo ASR cementów wieloskładnikowych CEM II/A,B i CEM V/A,B, zawierających popiół lotny krzemionkowy V oraz granulowany żużel wielkopiecowy S. Przedmiotem badań były cementy zawierające jeden z wymienionych dodatków lub ich kompozycję w proporcji masy 1:1. Badania odporności cementów na siarczany prowadzono metodą długoterminową, według procedury będącej załącznikiem A do normy PN-B-19707 [5]. Metoda polega na pomiarze ekspansji zapraw przechowywanych w roztworze Na_2SO_4 . Kryterium

Tablica 1. Wymagania dla cementów o niskim cieple hydratacji LH [1] i bardzo niskim cieple hydratacji VLH [3]

Odmiana cementu	Rodzaj cementu	Wymagania	Metody badań
Cementy o niskim cieple hydratacji LH według PN-EN 197-1	Każdy cement powszechnego użytku według PN-EN 197-1	Ciepło hydratacji po 41 godzinach $\leq 270 \text{ J/g}$	PN-EN 196-9 Metoda semiadiabatyczna
		Ciepło hydratacji po 7 dniach $\leq 270 \text{ J/g}$	PN-EN 196-8 Metoda rozpuszczenia
Cementy o bardzo niskim cieple hydratacji VLH według PN-EN 14216	Cement hutniczy III/B i III/C Cementu pucolanowy IV/A i IV/B Cement wieloskładnikowy V/A i V/B, wyłącznie klasy wytrzymałości 22,5	Ciepło hydratacji po 41 godzinach $\leq 220 \text{ J/g}$	PN-EN 196-9 Metoda semiadiabatyczna
		Ciepło hydratacji po 7 dniach $\leq 220 \text{ J/g}$	PN-EN 196-8 Metoda rozpuszczenia

Tablica 2. Klasyfikacja cementów odpornych na siarczany SR według PN-EN-197-1:2012

Rodzaj cementu SR	Odmiana cementu	Kryterium klasyfikacji
Cement portlandzki CEM I-SR	CEM I-SR 0	Zawartość w klinkierze $\text{C}_3\text{A} = 0\%$
	CEM I-SR 3	Zawartość w klinkierze $\text{C}_3\text{A} \leq 3\%$
	CEM I-SR 5	Zawartość w klinkierze $\text{C}_3\text{A} \leq 5\%$
Cement hutniczy CEM III-SR	CEM III /B-SR	Wyłącznie minimalna zawartość żużla wielkopiecowego jak dla cementów powszechnego użytku odmiany B,C
	CEM III/C-SR	
Cement pucolanowy CEM IV-SR	CEM IV/A-SR	Zawartość C_3A w klinkierze $\leq 9\%$. W skład tego rodzaju cementu wchodzi popiół lotny krzemionkowy V i/lub pucolana naturalna P
	CEM IV/B-SR	

Tablica 3. Wymagania dotyczące cementu specjalnego odpornego na siarczany HSR według

Rodzaj cementu HSR	Wymagania		
	Udział składnika nie klinkierowego [% mas] cementu	Odporność na siarczany	Klinkier
CEM II/A-V CEM II/A-S CEM II/A-M (S-V) CEM II/B-S	Brak wymagań	Odporność na agresję siarczanową wyrażona jako wartość ekspansji w roztworze Na_2SO_4 po 52 tygodniach $X_1 \leq 0,5\%$ Metoda badania – Załącznik A do normy PN-EN 19707:2013	Zawartość glinianu trójwapniowego $\text{C}_3\text{A} \leq 5\%$
CEM II/B-V	udział popiołu lotnego krzemionkowego $\geq 25\%$		Brak wymagań
CEM II/B-M (S-V)	udział popiołu lotnego krzemionkowego V $\geq 20\%$		Brak wymagań
CEM III/A	udział granulowanego żużla wielkopiecowego S $\leq 49\%$		$\text{C}_3\text{A} \leq 9\%$
CEM III/A	udział granulowanego żużla wielkopiecowego S $\geq 50\%$		Brak wymagań
CEM V/A (S-V) CEM V/B (S-V)	PN-EN 197-1		Brak wymagań

odporności na siarczany stanowi ekspansja zaprawy wynosząca poniżej $0,5\%$, po 52 tygodniach ekspozycji.

Badanie odporności cementów na reakcję alkalia-kruszywo wykonano zgodnie z metodyką zawartą w normach amerykańskich ASTM C1260 i ASTM C227 [21, 22]. Metody polegają na pomiarach ekspansji zapraw w roztworze NaOH w temperaturze 80°C (metoda przyspieszona) i w wodzie w temperaturze 38°C (metoda długoterminowa). Kryterium odporności na reakcję ASR cementu jest ekspansja zapraw wynosząca poniżej $0,1\%$, odpowiednio po 14 i 364 dniach ekspozycji. Do badań zastosowano kruszywo żwirowe węglanowo-krzemianowe o udokumentowanej reaktywności alkalicznej.

Tablica 4. Wymagania dotyczące cementu specjalnego niskoalkalicznego NA, według PN-B-19707:2013 [5], oraz zawartość alkaliów czynnych w cementach

Rodzaj cementu NA	Wymagania		Alkalia aktywne *Na ₂ O _{eq} [% mas.]
	Udział składnika nie klinkierowego [% mas] cementu	Całkowita zawartość alkaliów Na ₂ O _{eq} [%mas.]	
CEM I CEM II/A-LL	Brak wymagań	≤0,60%	0,30-0,47
CEM II/A-V	Udział żużla S, popiołu V; S+V ≥14%	≤1,20%	0,51
CEM II/A-S		≤0,70%	0,48
CEM II/A-M (S-V)		≤1,20%	0,47
CEM II/B-V	Udział popiołu lotnego krzemionkowego ^b V ≥25%	≤1,50%	0,52
CEM II/B-S	PN-EN 197-1	≤0,80%	0,48
CEM II/B-M (S-V)	Udział popiołu lotnego krzemionkowego ^b V ≥20%	≤1,30%	0,51
CEM III/A	Udział granulowanego żużla wielkopieczowego S ≤49%	≤0,95%	0,28
	Udział granulowanego żużla wielkopieczowego S ≥50%	≤1,10%	0,34
CEM III/B-C	PN-EN 197-1	≤2,00%	0,18-0,25
CEM IV/A (V)	Udział popiołu lotnego krzemionkowego ^b V ≥25 %	≤1,50%	0,48
CEM IV/B (V)	PN-EN 197-1	≤2,00%	0,36
CEM V/A (S-V)	Udział sumy popiołu lotnego krzemionkowego ^b i granulowanego żużla wielkopieczowego (S+V) ≤49%	≤1,60%	0,28
	Udział sumy popiołu lotnego krzemionkowego ^b i granulowanego żużla wielkopieczowego (S+V) ≥50%	≤2,00%	0,16
CEM V/B (S-V)	PN-EN 197-1	≤2,00%	0,16-0,21

*oznaczono według metody zawartej w normie ASTM C 114-04 [20]

Tablica 5. Charakterystyka składników cementu

Rodzaj surowca	Właściwości
Klinkier specjalny SR/NA	C ₃ S 60%; C ₂ S 18%; C ₃ A 5%; C ₄ AF 12%; CaO _w 1,0%; Całkowita zawartość alkaliów 0,45% Na ₂ O _{eq} ; alkalia czynne 0,38% Na ₂ O _{eq}
Zwykły klinkier portlandzki OPC	C ₃ S 59%; C ₂ S 19%; C ₃ A 9%; C ₄ AF 8%; CaO _w 1,5%; Całkowita zawartość alkaliów 0,80% Na ₂ O _{eq} ; alkalia czynne 0,68% Na ₂ O _{eq}
Granulowany żużel wielkopieczowy S	Faza szklista 87,5%, S ₂ – 0,79%, Całkowita zawartość alkaliów 0,87% Na ₂ O _{eq} ; alkalia czynne 0,015% Na ₂ O _{eq}
Popiół lotny krzemionkowy V	Strata prażenia 3,9%, zawartość części palnych 3,7%; Całkowita zawartość alkaliów 3,10% Na ₂ O _{eq} ; alkalia czynne 0,067% Na ₂ O _{eq} ; Miałkość 37%

Tablica 6. Skład cementów wieloskładnikowych

Rodzaj cementu wg PN-EN 197-1	Składnik cementu				
	Klinkier SR/NA	Klinkier OPC	Żużel wielkopieczowy S	Popiół lotny krzemionkowy V	Reagips*
	Udział składnika, % masy				
CEM II/A-S	77	-	18	-	5
CEM II/B-S	62	-	33	-	5
CEM II/A-V	77	-	-	18	5
CEM II/A-M (S-V)	77	-	9	9	5
CEM V/A (S-V)	-	40	27,5	27,5	5
CEM V/B (S-V)	-	20	37,5	37,5	5

Tablica 7. Właściwości fizyczne cementów

L.P.	Oznaczenie cementu wg PN-EN 197-1	Powierzchnia właściwa wg Blaine'a cm ² /g	Wodozadržalność %	Czas wiązania min		Rozptyw* cm	St. obj. mm
				początek	koniec		
1.	CEM I SR 5/NA	3200	27,5	190	300	19,4	0
2.	CEM I OPC	3300	28,0	160	280	19,8	0
3.	CEM II/A-S	3400	27,0	280	315	19,4	0
4.	CEM II/B-S	3800	26,0	300	330	19,8	0
5.	CEM II/A-V	3500	29,0	335	370	19,7	0
6.	CEM II/A-M (S-V)	3600	28,0	320	365	19,5	0
7.	CEM V/A (S-V)	4200	29,0	350	410	19,5	0
8.	CEM V/B (S-V)	4600	30,5	370	445	19,0	0

Uwaga* – konsystencja zaprawy na stoliku potrząsalnym wg PN-EN 1015-3

Przedmiotem badań były cementy CEM II i CEM V wyprodukowane w skali laboratoryjnej z przemysłowych klinkierów portlandzkich; zwykłego klinkieru portlandzkiego OPC i klinkieru specjalnego zawierającego poniżej 5% C₃A i poniżej 0,6% Na₂O_{eq}. Cementy produkowano z dodatkiem popiołu i/lub żużla, w ilości zbliżonej do maksymalnej zawartości dopuszczalnej dla cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/A-M (S,V), tj. 18% i 33% dla cementu CEM II/B-M (S-V).

Cementy wieloskładnikowe CEM V/A,B(S,V) wyprodukowano ze zwykłego klinkieru portlandzkiego OPC zawierającego 9% C₃A i 0,8% Na₂O_{eq} oraz mieszaniny popiołu i żużla w ilości 55% i 75% w cemencie, w proporcji popiół/żużel 1:1. Cementy mielono w młynku laboratoryjnym z dodatkiem reagipsu, do powierzchni właściwej typowej dla cementów wieloskładnikowych CEM II/A,B i CEM V/A,B wytwarzanych w warunkach przemysłowych. Charakterystykę składników cementów użytych do badań zestawiono w tablicy 5, a skład badanych cementów podano w tablicy 6.

Wyniki badań właściwości fizycznych i mechanicznych cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II i cementów wieloskładnikowych CEM V oraz cementu portlandzkiego CEM I bez przedstawiono w tablicach 7 i 8.

W tablicy 9 zamieszczono wyniki ekspansji normowych zapraw cementowych przechowywanych w roztworze Na₂SO₄, a tablicy 10 zestawiono wyniki ekspansji alkalicznej zapraw, wyznaczone metodą przyspieszoną i długoterminową.

5. Charakterystyka wybranych cementów specjalnych oferowanych na rynku krajowym

Cechy charakterystyczne wybranych cementów specjalnych produkowanych w kraju (SR, HSR – odpornych na siarczany, LH o niskim cieple hydratacji i VLH o bardzo niskim cieple hydratacji) podano w tablicy 11. Stosowanie tego rodzaju cementu w wykonawstwie obiektów budowlanych to wyższa trwałość i dłuższy cykl ich życia.

6. Podsumowanie

Aktualne europejskie i krajowe normy cementowe obejmują szeroką grupę cementów specjalnych: o niskim (LH) i bardzo niskim cieple hydratacji (VLH), odpornych na siarczany SR i HSR oraz niskoalkaliczne NA. Są to właściwości umożliwiające projektowanie i wykonanie konstrukcji betonowych o dużej trwałości, np. betonów pracujących w warunkach agresji siarczanowej, betonów masywnych i hydrotechnicznych, itp.

Znowelizowana norma krajowa PN-B 19707:2013 uwzględnia szereg nowych cementów specjalnych siarczanoodpornych HSR i niskoalkalicznych NA z grupy cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A,B i cementów wieloskładnikowych CEM V/A,B.

Cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM II/A-V, CEM II/A-M (S-V) produkowane na bazie klinkieru specjalnego, zawierającego poniżej 5% C₃A i poniżej 0,6% Na₂O_{eq}, oraz cementy wieloskładnikowe CEM V/A (S-V) i CEM V/B (S-V) wyprodukowane na bazie zwykłego klinkieru portlandzkiego OPC spełniają wymagania cech charakterystycznych przyjętych w aktualnej

normie krajowej PN-B-19707:2013, wykazując korzystniejsze od produkowanych dotychczas cementów parametry odporności na korozję siarczanową i reakcję alkaliczną.

Możliwości wdrożenia na dużą skalę, w warunkach przemysłowych, cementów HSR i NA z grupy cementów portlandzkich CEM II i cementów CEM V pozwoli także na obniżenie wskaźnika klinkierowego, a co za tym idzie emisji CO₂ przy produkcji tych cementów w stosunku do energochłonnych i wysokoemisyjnych cementów portlandzkich specjalnych CEM I.

dr inż. Albin Garbacik prof. ICiMB
Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych
Oddział Szkoła i Materiałów Budowlanych w Krakowie
dr hab. inż. Zbigniew Giergiczyński prof. Pol. Śl.
Politechnika Śląska w Gliwicach
Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o.,
Dąbrowa Górnicza/Chorula

Literatura

- 1 PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
- 2 PN-EN 206-1:2003 Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- 3 PN-EN 14216:2005 Cement – Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów specjalnych o bardzo niskim cieple.
- 4 PN-B-19707:2003 Cement, Cement specjalny – Skład, wymagania i kryteria zgodności
- 5 PN-B-19707:2013 Cement, Cement specjalny – Skład, wymagania i kryteria zgodności
- 6 Giergiczyński Z.: Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych, Monografia 325, Politechnika Krakowska, Kraków 2007
- 7 Garbacik A., Normalizacja cementów niskoalkalicznych, „Budownictwo i Architektura”, 2006, str. 56-58
- 8 Chłędziński S., Garbacik A., Cementy wieloskładnikowe w budownictwie, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2008
- 9 Giergiczyński Z., Popiół lotny w składzie cementu i betonu, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013
- 10 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Beijing, China, 2004
- 11 Peukert S., „Badania odporności nowych rodzajów kruszyw krzemionkowych na reakcję z alkalią w betonie”, grant badawczy nr 8 T07E026, IMMB, grudzień 2003
- 12 Kurdowski W., „Wpływ dodatków pucolanowych na ekspansję alkaliczną betonu”, grant badawczy nr 5 T07E040, IMMB, listopad 2005
- 13 „Badania cementów niskoalkalicznych według projektu normy: Cementy specjalne”, Praca badawcza IMMB nr 111/02/01/2005 na zlecenie SPC
- 14 „Cementy specjalne z dodatkami”, Praca badawcza IMMB nr 335/08/01/1357, kwiecień 2010
- 15 „Badanie właściwości betonów wykonanych na nowych cementach wieloskładnikowych”, Praca badawcza IMMB nr 179/08/01/1353, listopad 2008
- 16 Garbacik A., Giergiczyński Z., Cementy specjalne – nowe kryteria klasyfikacji, wymagań i oceny zgodności, Kontra 2014
- 17 Baran T., Garbacik A., Badania nowych rodzajów cementów wieloskładnikowych w zakresie wymagań

stawianych dla cementów specjalnych w normie krajowej PN-B-19707, Kontra 2014

- 18 Chłędziński S., Garbacik A., Problemy standaryzacji metod badania odporności cementów na agresję siarczanową w systemie norm europejskich, Kontra 2002
- 19 Owsiak Z., Reakcje kruszyw krzemionkowych z alkalią w betonie, Polski Biuletyn Ceramiczny, „Ceramik” Vol. 72, Kraków 2002
- 20 ASTM C114-04 Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement
- 21 ASTM C1260 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)
- 22 ASTM C227 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregates (Mortar-Bar Method)

Tablica 8. Właściwości mechaniczne cementów

L.P.	Oznaczenie cementu wg PN-EN 197-1	Powierzchnia właściwa wg Blaine'a cm ² /g	Wytrzymałość na zginanie w MPa, po upływie dni			Wytrzymałość na ściskanie w MPa, po upływie dni		
			2	7	28	2	7	28
1.	CEM I SR 5/NA	3200	4,1	5,4	6,3	18,5	33,3	48,2
2.	CEM I OPC	3300	4,5	5,6	6,6	26,2	37,5	52,4
3.	CEM II/A-S	3400	3,8	5,1	6,2	19,5	29,6	47,2
4.	CEM II/B-S	3800	3,6	4,9	5,8	19,8	28,5	41,2
5.	CEM II/A-V	3500	4,0	5,4	6,3	20,3	32,1	45,6
6.	CEM II/A-M (S-V)	3600	3,9	5,6	6,2	20,1	30,1	47,5
7.	CEM V/A (S-V)	4200	3,0	4,4	5,8	13,8	24,4	40,4
8.	CEM V/B (S-V)	4600	2,8	4,2	5,7	9,3	21,3	38,6

Tablica 9. Ekspansja cementów w roztworze Na₂SO₄

Rodzaj cementu										
CEM I SR5/NA	CEM I OPC	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM II/A-V	CEM II/A-M (S-V)	CEM V/A (S-V)	CEM V/B (S-V)	CEM II/B-V*	CEM IV/B*	CEM III/A*
Ekspansja po 52 tygodniach ekspozycji w roztworze Na ₂ SO ₄ , %										
0,283	destrukcja	0,158	0,096	0,077	0,156	0,088	0,045	0,086	0,068	0,068

Kryterium odporności cementów na siarczany, wartość ekspansji poniżej 0,5%

* wyniki badań kontrolnych cementów specjalnych HSR rynkowych

Tablica 10. Ekspansja alkaliczna zapraw

L.P.	Oznaczenie cementu wg PN-EN 197-1	Ekspansja wg normy ASTM C1260* po 14 dniach	Ekspansja wg normy ASTM C227* po 364 dniach
		%	
1.	CEM I SR 5/NA	0,08	0,017
2.	CEM I OPC	0,18	0,092
3.	CEM II/A-S	0,08	0,010
5.	CEM II/B-S	0,06	0,002
6.	CEM II/A-V	0,05	0,004
7.	CEM II/A-M (S-V)	0,06	0,006
8.	CEM V/A (S-V)	0,08	0,009
9.	CEM V/B (S-V)	0,06	0,006

Uwaga: *kryterium reaktywności kruszywa lub alkaliczności cementu stanowi wartość ekspansji 0,1 %

Tablica 11. Charakterystyka wybranych cementów specjalnych

Rodzaj cementu	Ekspansja w roztworze Na ₂ SO ₄ po upływie 52 tygodni [%]	Ciepło hydratacji po upływie 41 h [J/g]
Cement portlandzki CEM I 42,5N- SR	0,291-0,325	*
Cement portlandzki CEM I 52,5N- SR	0,306-0,390	
Cement portlandzki CEM I 52,5R- SR	0,330-0,412	
Cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V 32,5R-HSR/LH	0,051-0,078	237-258
Cement pucolanowy CEM IV/B-V 32,5R- HSR/LH	0,047-0,059	216-235
Cement hutniczy CEM III/A 32,5N-HSR/LH	0,038-0,065	200-231
Cement hutniczy CEM III/A 42,5N -HSR/LH	0,033-0,039	226-260
Cementy wieloskładnikowe CEM V/A (S-V) 32,5N-HSR/LH	0,04-0,065	215-250
Cementy wieloskładnikowe CEM V/B (S-V) 32,5N -HSR/LH	0,011-0,015	175-189
Cement o bardzo niskim cieple hydratacji VLH V/B (S-V) 22,5	0,008-0,01	85-90

* Cementy o umiarkowanym wysokim cieple hydratacji