

dr inż. Jacek Halbiniak¹⁾

ORCID: 0000-0002-2299-5913

mgr inż. Damian Jończyk^{1)*}

ORCID: 0000-0003-2161-4768

Possibilities of using waste ceramic roof tiles and clinker bricks for cement production

Możliwości wykorzystania odpadowych dachówek ceramicznych i cegieł klinkierowych do produkcji cementu

DOI: 10.15199/33.2025.10.28

Abstract. The paper presents the results of research on the possibilities of using waste materials from ceramic roof tiles and clinker bricks for cement production. The waste was crushed in a mill and ground with Portland clinker. Six series of modified cements were obtained in this way. The following tests were performed: compressive and bending strength, beginning of setting time and degree of grinding. The most favorable results were obtained for cements in which ceramic roof tiles were used, but the use of clinker bricks is also possible. In both cases, higher values of compressive strength were obtained after 28 days (with clinker replacement in the amounts of 6 and 12%) in relation to the reference cement.

Keywords: cement; ceramic roof tiles; clinker bricks; waste utilization; ceramic waste.

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badania możliwości wykorzystania materiałów odpadowych z dachówek ceramicznych oraz cegieł klinkierowych do produkcji cementu. Odpady zostały rozdrobnione w młynie i zmielone z klinkierem portlandzkim. Uzyskano w ten sposób sześć serii cementów modyfikowanych. Wykonano badania: wytrzymałości na ściskanie i zginanie, początku czasu wiązania oraz stopnia zmielenia. Najkorzystniejsze wyniki uzyskano w przypadku cementów, w których zastosowano dachówki ceramiczne, ale można wykorzystać również cegły klinkierową. W obu przypadkach uzyskano większą wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach (przy zastąpieniu klinkieru w ilościach 6 i 12%) w stosunku do cementu referencyjnego.

Słowa kluczowe: cement; dachówki ceramiczne; cegły klinkierowe; wykorzystanie odpadów; odpady ceramiczne.

The cement sector consumes up to 25% of total industrial energy consumption and is responsible for 5 – 8% of greenhouse gas emissions. In 2023, approximately 4.1 billion tons of cement were produced worldwide, and the production of 1 ton of cement releases approximately 870 kg of CO₂, of which over 550 kg is CO₂ from the calcination reaction in the rotary kiln [1].

Increasing pressure on the cement and concrete industry and dwindling natural resources are forcing producers to implement new technologies and seek alternative solutions to minimize CO₂ emissions and alternative raw materials for cement production. In 2020, the European Cement Association Cembureau [2] established the so-called The Road Map aims to almost completely integrate cement and concrete into a circular economy, where waste will be treated as a resource that can be reused in the production of cement binder or concrete. It assumes, among other things, that the use of alternative fuels in cement production will reach 95% by 2050. Currently, intensive research is being conducted worldwide, the results of which have been partially implemented in the cement industry. This research aims to **achieve the large-scale use of**

Sektor cementowy pochłania do 25% całkowitego zużycia energii w przemyśle oraz odpowiada za 5 – 8% emisji gazów cieplarnianych. W 2023 r. wyprodukowano na całym świecie ok. 4,1 mld ton cementu, a produkcja 1 tony cementu prowadzi do uwolnienia ok. 870 kg CO₂, z czego ponad 550 kg to CO₂ pochodzący z reakcji kalcynacji w piecu obrotowym [1].

Coraz większa presja wobec przemysłu cementowego i betonowego oraz kurczące się złoża naturalne wymuszają na producentach wdrażanie nowych technologii oraz szukanie alternatywnych rozwiązań prowadzących do zminimalizowania emisji CO₂ i alternatywnych surowców do produkcji cementu. W 2020 r. Europejskie Stowarzyszenie Cementu Cembureau [2] wytyczyło tzw. Mapę Drogową, zmierzającą do prawie całkowitego wpisania cementu i betonu w gospodarkę o obiegu zamkniętym, w której odpad będzie traktowany jako zasób, który może być ponownie zastosowany do produkcji spoiwa cementowego bądź betonu. Założono w niej m.in. wykorzystanie paliw alternatywnych przy produkcji cementu na poziomie 95% do 2050 r. Obecnie prowadzone są na świecie intensywne badania, których wyniki częściowo wdrożono do przemysłu cementowego. Mają one na celu **zastosowanie na dużą skalę paliw alternatywnych**, takich jak: biomasa; zielony wodór; wykorzystanie energii słonecznej czy stapianie surowców w niskiej temperaturze [2]. Obecnie

¹⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

^{*)} Adres do korespondencji: damian.jonczyk@pcz.pl

alternative fuels, such as biomass; green hydrogen; solar energy; and low-temperature melting of raw materials [2]. Currently, commonly used alternative fuels include used tires, railway sleepers, asphalt shingles, plastics, natural gas, municipal and food waste, rice husks, waste oil, and many others [3, 4].

The second important issue is **the implementation of alternative raw materials** for cement production, which would significantly reduce the use of natural resources. Limestone, clay, marl, and chalk are used to produce Portland clinker. Their dwindling resources are forcing cement producers to search for new materials that can partially replace clinker. In various countries, depending on the availability of raw materials, research is being conducted on the use of local waste that can be used as alternative raw materials for cement production. In the Kimura project in Finland, crushed composite materials from wind turbine blades were used to produce Portland clinker [2]. Sungwun et al. [5] used eggshell powder instead of limestone, while in [6] marble dust was used. In Poland, various additives are commonly used. Various cement additives are widely used in Poland, with the aim to reduce CO₂ emissions produced by the cement sector [7, 8]. From cement to ceramics, due to its high chemical and biological resistance and the fact that in some sectors the daily waste during its production reaches up to 30%, has become an alternative raw material, mainly as an aggregate for materials with a cement matrix [9]. Recycled aggregates from ceramic ornaments [10], sanitary ceramics [1 – 13], and ceramic tiles [14] are used for concrete. There are also cases where expansive perlite or limestone is used [15, 16]. Research results are becoming increasingly common, in which authors use various ceramics, from paving to cement, as a partial substitute for cement in the production of concrete and cement. Muntadher et al. [17] replaced cement in amounts of 10% and 20% with powdered ceramics with a grain size below 0.85 µm. The studies showed that concretes in which 10% of the cement was replaced with powdered ceramics had all mechanical properties similar to those of the reference concrete. In the work [18], in which cement was replaced with an additive of 20% recycled ceramics, concrete composites were obtained with high resistance to chloride corrosion and carbonization. Concretes with this additive were also characterized by a denser microstructure, which resulted in increased compressive and flexural strength. According to Hussein Joudah et al. [19] they showed that replacing cement with ceramic powder, derived from waste ceramic tiles, in amounts of 10, 20 and 30% increases the strength of the tested concretes after 28 days of curing, but higher values of replacing cement with ceramic powder do not negatively affect the mechanical parameters of the concrete composites. Similar conclusions were presented in [20], which found that significant amounts of ceramic waste, as a substitute for cement, caused a reduction in compressive strength, including initial strength. Lang Pang et al. [21] used ceramic polishing powder, generated during the production of ceramic tiles, as a partial substitute for cement in amounts

powszechnie stosuje się jako paliwa alternatywne m.in. zużyte opony, podkłady kolejowe, gonty asfaltowe, tworzywa sztuczne, gaz ziemny, odpady komunalne i spożywcze, łuski ryżowe, odpady olejowe i wiele innych [3, 4].

Drugim istotnym zagadnieniem jest **wdrożenie do produkcji cementu alternatywnych surowców**, które ograniczyłyby w znacznym stopniu wykorzystywanie złóż naturalnych. Do produkcji klinkieru portlandzkiego stosuje się kamień wapienny, glinę, margiel i kredę. Kurczące się ich zasoby zmuszają producentów cementu do poszukiwania nowych materiałów, które mogą częściowo zastąpić klinkier. W różnych krajach, w zależności m.in. od dostępności surowców, prowadzone są badania dotyczące zastosowania lokalnych odpadów, które można zastosować jako alternatywne surowce do produkcji cementu. W projekcie Kimura w Finlandii wykorzystano do produkcji klinkieru portlandzkiego pokruszone materiały kompozytowe pochodzące z łopat turbin wiatrowych [2]. Sungwun i inni [5] użyli proszku ze skorupki jaj zamiast kamienia wapiennego, natomiast w pracy [6] zastosowano mączkę z pyłu marmurowego. W Polsce powszechnie stosowane są różne dodatki do cementu, które mają na celu doprowadzenie do zmniejszenia emisji CO₂ wytwarzanego przez sektor cementowy [7, 8]. Odpadowa ceramika, ze względu na dużą odporność chemiczną i biologiczną oraz fakt, że w niektórych sektorach dzienny odpad przy jej produkcji sięga nawet 30%, stała się alternatywnym surowcem głównie jako kruszywo do materiałów o matrycy cementowej [9]. Do betonów stosowano recyklingowe kruszywo pochodzące z ceramicznych ozdób [10], ceramiki sanitarnej [1 – 13] czy płytek ceramicznych [14]. Spotkać można także przypadki zastosowania perlitu ekspandowanego czy kamienia wapiennego [15, 16]. Coraz częściej spotyka się wyniki badań, w których autorzy stosują różną ceramikę odpadową jako częściowy zamiennik cementu przy produkcji betonu i cementu. Muntadher i inni [17] zastępowali cement, w ilości 10 i 20%, sproszkowaną odpadową ceramiką o wielkości ziarna poniżej 0,85 µm. Badania wykazały, że betony, w których zastąpiono 10% cementu odpadem w postaci sproszkowanej ceramiki, miały wszystkie właściwości mechaniczne zbliżone do betonu referencyjnego. W pracy [18], w której zastępowano cement dodatkiem z recyklingowej ceramiki w ilości 20% uzyskano kompozyty betonowe o dużej odporności na korozję chlorkową i karbonatyzację. Betony z tym dodatkiem charakteryzowały się też zagęszczoną mikrostrukturą, co skutkowało zwiększeniem wytrzymałości na ściskanie i zginanie. Zahraa Hussein Joudah i inni [19] wykazali, że zastąpienie cementu proszkiem ceramicznym, pochodzącym z odpadowych płytek ceramicznych, w ilości 10, 20 i 30% zwiększa wytrzymałość badanych betonów po 28 dniach dojrzewania, ale większe wartości zastępowania cementu mączką ceramiczną negatywnie wpływają na parametry mechaniczne kompozytów betonowych. Podobne wnioski przedstawiono w pracy [20], w której stwierdzono, że znaczne ilości odpadów ceramicznych, jako substytutu cementu, powodują zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie, w tym także wytrzymałości wczesnej. Lang Pang i inni [21] zastosowali do zapraw cementowych ceramiczny proszek polerski, powstający przy produkcji płytek ceramicznych jako częściowy zamiennik cementu w ilo-

of 10 and 20%. The introduction of this waste into the composites of the cement matrix resulted in its sealing, which resulted in an increase in compressive strength by over 17% when replacing 10% of the cement and by 14% when replacing 20% of the cement. These results refer to the strength after 90 days of curing. In the study [22], 10% of the cement was replaced with ceramic waste powder, and the strength decrease was 5.8%. Different research results were obtained by Parashar et al. [23], who found an increase in the strength of concrete composite by 6.9% when 10% of the cement was replaced with ceramic powder from PA. In Poland, the use of ceramics as aggregates in concrete is becoming more common [11 – 13], but it is not a popular product as a cement additive. Previous studies did not yield clear results regarding the strength of concrete after the introduction of additives. The literature reports both increased and decreased strength. Ceramic roof tiles and clinker bricks are frequently encountered as waste, so their use may be justified. However, many articles often lack reference to the type of waste already used.

The aim of this article is to determine the influence of the addition of paving stones to building ceramics in the form of clinker bricks and ceramic roof tiles, in various weight proportions, on the average compressive strength of concrete.

Research program

In the adopted research program, ceramic tiles from ceramic roof tiles and clinker bricks were used. The ceramic tiles used for the research consisted of defective burgundy-colored elements from a production plant near Częstochowa. The roof tiles and clinker bricks were initially crushed and then ground in a mill to a fraction of 2 – 4 mm. The resulting crushed cement was ground with previously burned Portland cement clinker and 5% anhydrite (setting time regulator). The Portland cement clinker and anhydrite were obtained from the Rudniki cement plant, belonging to the Cemex company. Grinding was performed in a laboratory ball mill at the Cemex laboratory. The ball mill feed was 5 kg, and the grinding time was 45 minutes. Crushed clinker bricks were dosed in the following amounts: 6% (cement series C6); 12% (cement series C12), and 22% (cement series C22).

Crushed ceramic roof tiles were dosed in the same proportions. Similarly, the following cement series were obtained with the addition of crushed clinker bricks from waste: D6, D12, and D22. A reference series of cement without ceramic additives (series C) was also prepared. The results of the SEN/EDS analysis of the Portland CEM I cement and the ceramic roof tiles are presented in Figure 1. The EDS spectrum of the cement shows the typical composition, dominated by Ca, Si, Al, and Fe. However, the analysis of the ceramic roof tiles indicates elevated levels of Si and Al, as well as Ti and Zn. This indicates the presence of aluminosilicate phases with potential pucola activity. The morphology and chemical composition of the ceramic roof

ści 10 i 20%. Wprowadzenie tego odpadu do kompozytów o matrycy cementowej spowodowało jej uszczelnienie, co skutkowało zwiększeniem wytrzymałości na ściskanie o ponad 17% przy zamianie cementu w ilości 10% oraz 14% przy zamianie cementu 20%. Wyniki te odnoszą się do wytrzymałości po 90 dniach dojrzewania. W pracy [22] zastąpiono 10% cementu ceramicznym proszkiem odpadowym, a spadek wytrzymałości wyniósł 5,8%. Odmienne wyniki badań uzyskał Parashar i inni [23], którzy stwierdzili zwiększenie wytrzymałości kompozytu betonowego o 6,9% w przypadku zastąpienia 10% cementu ceramicznym proszkiem odpadowym. W Polsce coraz częściej można spotkać zastosowanie ceramiki jako kruszywa w betonie [11 – 13], natomiast nie jest to produkt popularny jako dodatek do cementu. Wcześniejsze badania nie dały jednoznacznych wyników dotyczących wytrzymałości betonu po wprowadzeniu dodatków. W literaturze występują doniesienia zarówno o zwiększeniu wytrzymałości, jak i o zmniejszeniu. Często spotykanymi odpadami ceramicznymi są dachówki oraz cegły klinkierowe, dlatego zasadne może być ich wykorzystanie. W wielu artykułach brakuje jednak często odniesienia do rodzaju użytego odpadu.

Celem artykułu jest określenie wpływu dodatku odpadowej ceramiki budowlanej w formie cegieł klinkierowych oraz dachówek ceramicznych, w różnych proporcjach wagowych, na średnią wytrzymałość betonu na ściskanie.

Program badawczy

W przyjętym programie badawczym zastosowano odpadową ceramikę pochodzącą z dachówek ceramicznych oraz cegieł klinkierowych. Wykorzystano do badań odpadową ceramikę stanowiły wadliwe elementy w kolorze bordowym, pochodzące z zakładu produkcyjnego w okolicach Częstochowy. Dachówki oraz cegły klinkierowe zostały wstępnie pokruszone, a następnie rozdrobnione w młynie do frakcji 2 – 4 mm. Uzyskaną w ten sposób rozdrobnioną ceramikę zmieszano z wcześniej wypalonym klinkierem portlandzkim oraz z anhydrytem (regulator czasu wiązania) w ilości 5%. Klinkier portlandzki oraz anhydryt uzyskano z cementowni Rudniki k. Częstochowy należącej do firmy Cemex. Mielenie przeprowadzono w laboratoryjnym młynie kulowym w laboratorium Cemex. Masa wsadu do młyna kulowego wynosiła 5 kg, a czas mielenia 45 min.

Rozdrobnione cegły klinkierowe były dozowane w ilości: 6% (seria cementu C6); 12% (seria cementu C12) oraz 22% (seria cementu C22). W tych samych proporcjach dozowano rozdrobnione dachówki ceramiczne. Analogicznie uzyskano następujące serie cementu z dodatkiem rozdrobnionych odpadowych cegieł klinkierowych, a mianowicie: D6, D12 oraz D22. Wykonano także serię referencyjną cementu bez dodatków ceramicznych (seria C). Wyniki analizy SEN/EDS dotyczącej cementu portlandzkiego CEM I oraz dachówki ceramicznej przedstawiono na rysunku 1. Widmo z analizy EDS cementu pokazuje typowy skład, w którym dominuje Ca, Si, Al oraz Fe. Analiza dachówki ceramicznej wskazuje natomiast podwyższone poziomy Si i Al oraz Ti i Zn. Wskazuje to na występowanie faz glinokrzemianowych o potencjalnej aktywności pucolanowej. Morfologia oraz skład chemiczny dachówek

tiles may suggest their suitability as a pucola additive to cement.

For all obtained cement series, the following tests were performed: flexural and compressive strength according to PN-EN 196-1 [24]; The grinding degree was determined by Bleine's air permeability according to PN-EN 196-6 [25] and setting time according to PN-EN 196-3 [26]. The flexural strength test was performed after 2, 7, 14, 28, and 90 days of curing, using three barrels of the standard for each series, and the compressive strength test was performed analogously, but on six halves of the barrels. The grinding degree test was performed four times for each series of cement. Compressive strength tests on standard mortars were also performed after 2, 7, 14, 28, and 90 days of maturation. The test results are presented in Figures 1 – 4 and Tables 1 and 2.

ceramicznych mogą sugerować ich przydatność jako dodatku pucolanowego do cementu.

W przypadku wszystkich uzyskanych serii cementów przeprowadzono badania: wytrzymałości na zginanie i ściskanie wg PN-EN 196-1 [24]; stopnia zmielenia metodą przepuszczalności powietrza Bleine'a wg PN-EN 196-6 [25] oraz czasu wiązania wg PN-EN 196-3 [26]. Badanie wytrzymałości na zginanie wykonano po 2, 7, 14, 28 i 90 dniach dojrzewania, stosując po 3 beleczki z zaprawy normowej w przypadku każdej serii, a badanie wytrzymałości na ściskanie analogicznie, ale na sześciu połówkach beleczek. Badanie stopnia zmielenia wykonano czterokrotnie w przypadku każdej serii cementu. Badanie wytrzymałości na ściskanie na zaprawach normowych realizowano również po 2, 7, 14, 28 i 90 dniach dojrzewania. Uzyskane wyniki badań przedstawiono na rysunkach 1 – 4 oraz w tabelach 1 i 2.

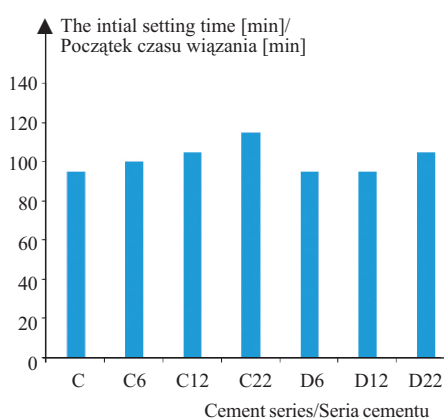


Fig. 1. The initial setting time of mortars with cements and red ceramics

Rys. 1. Początek czasu wiązania zapraw z cementami z dodatkiem ceramiki czerwonej

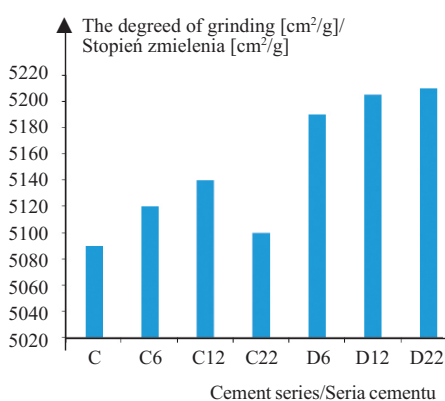


Fig. 2. The degree of grinding of mortars with cements and red ceramics

Rys. 2. Stopień zmielenia zapraw z cementami z dodatkiem ceramiki czerwonej

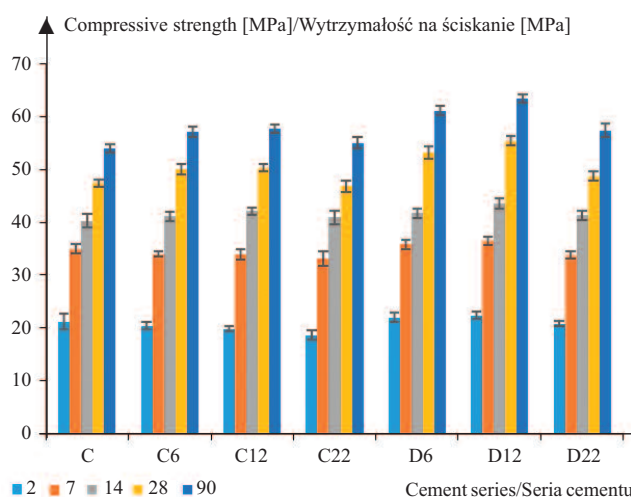


Fig. 3. Compressive strength of mortars with cements and red ceramics

Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie zapraw z cementami z dodatkiem ceramiki czerwonej

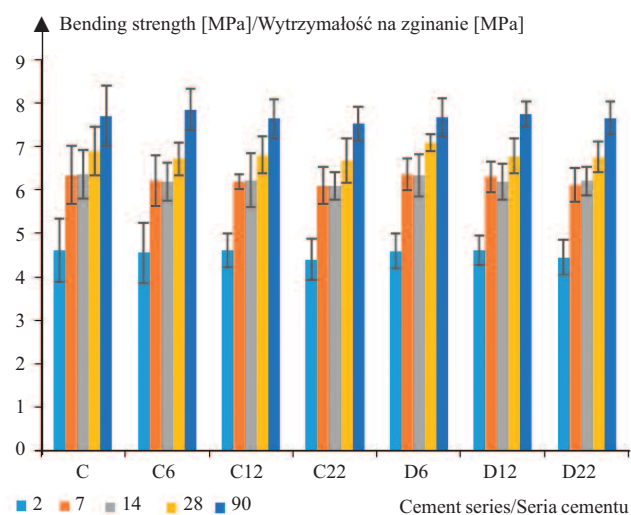


Fig. 4. Bending strength of mortars with cements and red ceramics

Rys. 4. Wytrzymałość na zginanie zapraw z cementami z dodatkiem ceramiki czerwonej

Table 1. The compressive and bending strength of mortars with cements and red ceramics

Tabela 1. Wytrzymałość na ściskanie i zginanie zapraw z cementami z dodatkiem ceramiki czerwonej

Cement series/ Seria cementu	Average compressive strength R_c determined after days with standard deviation [MPa]/ Średnia wytrzymałość na ściskanie R_c wraz z odchyleniem standardowym [MPa] określona po dniach									
	2		7		14		28		90	
C	21,3	1,43	35,0	0,88	40,4	1,22	47,5	0,74	54,0	0,79
C6	20,5	0,78	34,1	0,56	41,2	0,93	50,2	0,98	57,2	0,90
C12	19,9	0,52	34,0	1,01	42,2	0,72	50,4	0,67	57,8	0,73
C22	18,7	0,91	33,2	1,31	41,0	1,24	46,9	1,04	55,1	1,13
D6	22,1	0,86	35,9	0,84	41,8	0,85	53,3	1,16	61,2	0,88
D12	22,5	0,69	36,5	0,76	43,6	0,97	55,5	0,94	63,5	0,84
D22	20,9	0,58	33,9	0,71	41,4	0,85	48,8	0,88	57,5	1,23
Cement series/ Seria cementu	Average bending strength R_b determined after days with standard deviation [MPa]/ Średnia wytrzymałość na zginanie R_b określona wraz z odchyleniem standardowym [MPa] po dniach									
	2		7		14		28		90	
C	4,61	0,73	6,34	0,68	6,36	0,56	6,88	0,56	7,70	0,70
C6	4,55	0,68	6,20	0,58	6,18	0,44	6,71	0,38	7,84	0,47
C12	4,60	0,39	6,18	0,17	6,21	0,62	6,80	0,43	7,63	0,44
C22	4,40	0,46	6,10	0,42	6,08	0,31	6,67	0,52	7,52	0,38
D6	4,59	0,41	6,35	0,37	6,33	0,50	7,09	0,20	7,67	0,44
D12	4,60	0,34	6,30	0,35	6,19	0,42	6,78	0,40	7,73	0,29
D22	4,44	0,40	6,11	0,39	6,20	0,32	6,75	0,35	7,65	0,38

Table 2. The setting time and the degree of grinding of mortars with cements and red ceramics

Tabela 2. Czas wiązania i stopień zmielenia zapraw z cementami z dodatkiem ceramiki czerwonej

Cement series/ Seria cementu	Water content in a slurry of standard consistency [%]/ Udział wody w zaczynie o normalowej konsystencji [%]	Start of setting time [min]/ Początek czasu wiązania [min]	Degree of grinding [cm ² /g]/ Stopień zmielenia [cm ² /g]
C	26,5	95	5090
C6	26,5	100	5120
C12	26,5	105	5140
C22	26,5	115	5100
D6	26,5	95	5190
D12	27,0	95	5205
D22	27,5	105	5210

Analysis of test results

Figure 5 presents the percentage increase and decrease in the average compressive strength of the untested cements with waste ceramic additives compared to the reference cement without ceramic additives.

The average compressive strength after 2 and 7 days of maturation of all cement series obtained by co-grinding Portland cement clinker with waste clinker bricks was slightly lower compared to the reference cement, which was also observed in other studies [16, 18, 20].

The largest percentage decrease in strength was observed for the C22 series cement after 2 days of maturation and amounted to 12.2%. This cement series also achieved the lowest compressive strength after 7, 14, and 28 days of curing, but its average strength at 90 days, taking into account the standard deviation, was comparable to that of the reference cement.

The average compressive strength of all modified cement series after 14 days of curing was statistically comparable to that of the reference cement. The highest increase of 4.5% was achieved by the C12 series cement. The average compressive strength of this cement series after 28 days of curing was 50.4 MPa, which was 6.1% higher than the reference cement. A similar relationship was

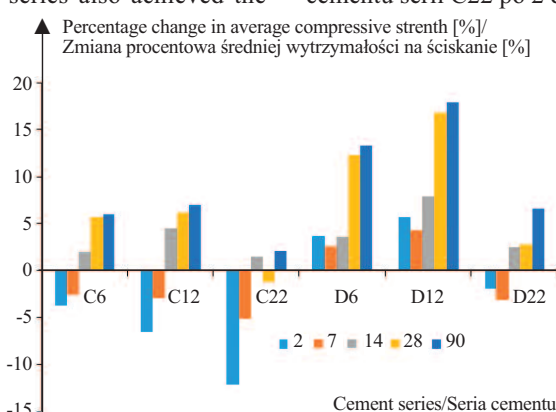
Analiza wyników badań

Na rysunku 5 przedstawiono procentowy przyrost oraz spadek średniej wytrzymałości na ściskanie badanych cementów z odpadowymi dodatkami ceramicznymi w porównaniu z cementem referencyjnym bez udziału ceramiki.

Średnia wytrzymałość na ściskanie po 2 i 7 dniach dojrzewania wszystkich serii cementów, uzyskanych ze wspólnego zmielenia klinkieru portlandzkiego z odpadowymi cegłami klinkierowymi, uzyskała niewiele mniejszą wartość w porównaniu z cementem referencyjnym, co było obserwowane również w innych pracach [16, 18, 20].

Największy procentowy spadek wytrzymałości dotyczył cementu serii C22 po 2 dniach dojrzewania i wyniósł 12,2%.

Ta seria cementu uzyskała także najmniejszą wytrzymałość na ściskanie po 7, 14 i 28 dniach dojrzewania, ale jej średnia wytrzymałość w 90 dniu, z uwzględnieniem odchylenia standardowego, była porównywalna do wytrzymałości cementu referencyjnego. Średnia wytrzymałość na ściskanie wszystkich modyfikowanych serii cementów po 14 dniach dojrzewania była statystycznie porównywalna z cementem referencyjnym. Największy przyrost 4,5% uzyskał cement serii C12. Średnia wartość wytrzymałości na ściskanie tej serii cementu wyniosła po 28 dniach dojrzewania 50,4 MPa i była większa

**Fig. 5. Percentage increases and decreases in the average compressive strength of mortars with cements containing red ceramics in relation to the reference mortar**

Rys. 5. Procentowy przyrost oraz spadek średniej wytrzymałości na ściskanie zapraw z cementami z dodatkiem ceramiki czerwonej w stosunku do zaprawy referencyjnej

obtained for this cement after 90 days of curing, in accordance with standard requirements. The average strength was 57.8 MPa, which was 7.0% higher than the reference cement. After 28 and 90 days of curing, C6 cement showed similar strength to C12 cement.

When analyzing the flexural strength of cements modified from waste clinker, it was found that only cement C6 achieved a higher average strength at 90 days of curing compared to the reference cement. The reduction in early strength when a larger amount of the additive was used may be caused by a reduction in the total amount of cement and the associated potential increase in porosity.

Cements modified with waste ceramic roof tiles of the D6 and D12 series achieved an average compressive strength incomparable to the reference cement already on the second day, which was also found in [22]. The average compressive strength was not higher by 3.8% for the D6 series and by 5.6% for the D12 series compared to the reference cement. A similar relationship was observed on the 7th day of curing, with an increase in compressive strength of 2.6% for the D6 series and 4.3% for the D12 series. After 28 and 90 days of curing, all cements modified with ceramic tiles achieved significantly higher strength than cement C without additives. The greatest increase was observed for cements D6 and D12 after 28 and 90 days of curing. At 28 and 90 days, the highest strength was achieved by the D12 series cement with a 12% addition of roofing tiles. The increase in strength compared to the reference cement was 16.8% and 17.9%, respectively. These results are consistent with the values obtained in [17], where a 10% addition of ceramics proved to be the most beneficial, and in [20] – 15%.

The reference cement achieved an **initial setting time** of 95 minutes. Cements modified from paving to clinker bricks achieved a slightly longer initial setting time. The longest was 115 minutes and was for the cement with a 22% addition of clinker bricks. The addition of paving to ceramic roof tiles in the D6 and D12 series cements did not affect the initial setting time. Only the 22% addition (D22 series) resulted in an extension of the initial setting time to 105 minutes. Therefore, the added additives did not affect the setting time or, at most, did not significantly extend it.

The grinding degree of the cements ranged from 5090 cm²/g for the reference cement to 5210 cm²/g for the cement with the addition of 22% ceramic roof tiles. Higher grinding degrees were achieved for the cements with the addition of ceramic roof tiles than for the cements with the addition of clinker bricks. It can therefore be assumed that these additives have achieved a fineness similar to that of clinker.

Due to the ceramic material, the intense color of the cements and their addition differed from the reference cement. The color of series C and D was darker than the reference cement, while the samples were a shade darker than the reference cement.

Adding ceramics from pa to wax in the amount suggested in the terrarium may increase the compressive strength of the

o 6,1% w porównaniu z cementem referencyjnym. Podobną zależność uzyskano w przypadku tego cementu w 90 dniu dojrzewania zapraw normowych. Średnia wytrzymałość wyniosła 57,8 MPa i była większa o 7,0% w porównaniu z cementem referencyjnym. Po 28 i 90 dniach dojrzewania cement C6 wykazał podobną wytrzymałość do cementu C12.

Analizując wytrzymałość na zginanie cementów modyfikowanych odpadową cegłą klinkierową, stwierdzono, że jedynie cement C6 w 90 dniu dojrzewania uzyskał większą średnią wytrzymałość w porównaniu z cementem referencyjnym. Zmniejszenie wytrzymałości wczesnej w przypadku zastosowania większej ilości dodatku może być spowodowane zmniejszeniem całkowitej ilości cementu oraz związanego z tym potencjalnym zwiększeniem porowatości.

Cementy modyfikowane odpadową dachówką ceramiczną serii D6 i D12 uzyskały już w drugim dniu średnią wytrzymałość na ściskanie porównywalną z cementem referencyjnym, co również stwierdzono w pracy [22]. Średnia wytrzymałość na ściskanie była większa o 3,8% w przypadku serii D6 oraz 5,6% serii D12 w porównaniu z cementem referencyjnym. Podobną zależność uzyskano w 7 dniu dojrzewania, gdzie przyrost wytrzymałości na ściskanie w przypadku serii D6 wyniósł 2,6%, a serii D12 – 4,3%. Po 28 i 90 dniach dojrzewania wszystkie cementy modyfikowane dachówką ceramiczną uzyskały wyraźnie większą wytrzymałość od cementu C bez dodatków. Największy wzrost stwierdzono w przypadku cementów D6 i D12 po 28 i 90 dniach dojrzewania. W 28 i 90 dniu największą wytrzymałość uzyskał cement serii D12 z dodatkiem 12% dachówki. Przyrost wytrzymałości w porównaniu z cementem referencyjnym wyniósł odpowiednio: 16,8 oraz 17,9%. Wyniki są zbliżone z wartościami uzyskanymi w pracach: [17], gdzie najkorzystniejszy okazał się dodatek 10% ceramiki oraz w [20] – 15%.

Cement referencyjny uzyskał **początek czasu wiązania** 95 min. Cementy modyfikowane odpadową cegłą klinkierową uzyskały nieznacznie dłuższy początek czasu wiązania. Najdłuższy wyniósł 115 min i dotyczył cementu z dodatkiem 22% cegły klinkierowej. Dodatek odpadowej dachówki ceramicznej w cementach serii D6 oraz D12 nie wpłynął na wydłużenie początku czasu wiązania. Dopiero dodatek w ilości 22% (seria D22) spowodował wydłużenie początku czasu wiązania do 105 min. Wprowadzone dodatki nie wpłynęły zatem na czas wiązania lub co najwyżej nieznacznie go wydłużyły.

Stopień zmielenia cementów wynosił od 5090 cm²/g w przypadku cementu referencyjnego do 5210 cm²/g – cementu z dodatkiem dachówki ceramicznej 22%. Większe wartości stopnia zmielenia uzyskały cementy z dodatkiem dachówki ceramicznej niż cementy z dodatkiem cegły klinkierowej. Można zatem uznać, że dodatki te uzyskały rozdrobnienie zbliżone do klinkieru.

Ze względu na materiały ceramiczne o intensywnym kolorze barwa cementów z ich dodatkiem różniła się od cementu referencyjnego. Kolor serii C i D był ciemniejszy od cementu referencyjnego, natomiast próbki były koloru szarego o ton ciemniejszego od cementu referencyjnego.

Dodanie ceramiki odpadowej w ilości sugerowanej w literaturze może powodować zwiększenie wytrzymałości na ściskanie cementu, wynikające z reakcji pucolanowej między krzemionką zawartą w ceramice a wodorotlenkiem wapnia wytwor-

cement, resulting from the pozzolana reaction between the silica contained in the ceramic and the calcium oxide produced during the hydration of the cement. The resulting substance thickens the microstructure and may cause an increase in compressive strength. Furthermore, the size of the ceramic particles can reduce the porosity of the cement matrix, leading to a more compact structure. Due to the slower reaction time of ceramics compared to cement, the increase in strength is visible at a later stage of maturation.

Conclusions

The different approaches to using paving stones and ceramic roof tiles for cement production used in the research yielded promising research results. Until now, paving stones and ceramic roof tiles were most often used as aggregate, or as flour added to concrete composites. In the present study, Portland cement clinker was co-milled with anhydride, which allowed for the production of modified cements.

Based on the conducted research, it was found that:

- all cements modified with waste clinker brick achieved comparable compressive strength to the reference cement after 90 days of curing;
- better results were obtained for cements modified with waste ceramic roof tiles than with ceramic bricks. All cement series (D6, D12, and D22) achieved an average compressive strength that was incomparable to or greater than the strength of the reference cement. However, a significantly higher compressive strength was not observed until days 28 and 90 of curing. The greatest increase in compressive strength was not achieved for the D12 series cement, in which 12% of the ceramic roof tiles were used;
- the tests conducted confirmed the test results, among others. It was found [20] that a high content of paving stones in cement leads to a reduction in its early strength. This was particularly evident when using paving stones and clinker. All cement series with this additive achieved a lower average compressive strength after 2 days of curing compared to the reference cement. A similar result was obtained for cement with a 22% content of ceramic roof tiles. The lower early strength of these cements, however, did not affect the standard or later strength, which was similar to or greater than that of cement without additives. The lower early strength of cements with ceramic additives can be taken into account in the appropriate recommendations for the use of cement in winter and summer;
- the additives used had no significant effect on the flexural strength of the cement or on the setting time.

Research shows that recycled clinker bricks and ceramic roof tiles can be used as a partial substitute for Portland cement clinker, and grinding them together is not a new approach to producing modified cements. More satisfactory research results were obtained for recycled cements and ceramic roof tiles than for clinker bricks, but bricks are also a good material for producing modified cements. In the case of both additives, the cement will achieve a strength class of 42.5, which is the same as the reference cement.

rzonym podczas hydratacji cementu. Powstała w ten sposób substancja zagęszcza mikrostrukturę i może spowodować zwiększenie wytrzymałości na ściskanie. Ponadto rozmiar cząstek ceramiki może zmniejszać porowatość w matrycy cementowej, co prowadzi do powstania bardziej zwartej struktury. Ze względu na wolniejszy czas reakcji ceramiki w porównaniu z cementem, zwiększenie wytrzymałości jest widoczne w późniejszym okresie dojrzewania.

Wnioski

Zastosowane w badaniach odmienne podejście do wykorzystania odpadowej cegły klinkierowej i odpadowej dachówki ceramicznej do produkcji cementu przyniosło obiecujące wyniki badań. Dotychczas odpadową ceramikę najczęściej stosowano jako kruszywo, ewentualnie jako mączkę, którą dodawano do kompozytów betonowych. W prezentowanych badaniach odpadową ceramikę zastosowano do wspólnego zmielenia klinkieru portlandzkiego z dodatkiem anhydrytu, co pozwoliło uzyskać cementy modyfikowane na etapie ich wytwarzania.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- wszystkie cementy modyfikowane odpadową cegłą klinkierową uzyskały w 90 dniu dojrzewania porównywalną wytrzymałość na ściskanie z cementem referencyjnym;
 - lepsze wyniki uzyskano w przypadku cementów modyfikowanych odpadową dachówką ceramiczną niż cegłą ceramiczną. Wszystkie serie cementów (D6, D12 oraz D22) uzyskały średnią wytrzymałość na ściskanie porównywalną lub większą niż wytrzymałość cementu referencyjnego. Wyraźnie większą wytrzymałość na ściskanie można zauważyć jednak dopiero w 28 i 90 dniu dojrzewania. Największy przyrost wytrzymałości na ściskanie uzyskano w przypadku cementu serii D12, w którym zastosowano 12% odpadowych dachówek ceramicznych;
 - przeprowadzone badania potwierdziły wyniki badań m.in. Kannana [20], że duża zawartość odpadowej ceramiki w cemencie prowadzi do zmniejszenia jego wytrzymałości wczesnej. Szczególnie było to wyraźne w przypadku zastosowania odpadowej cegły klinkierowej. Wszystkie serie cementów z tym dodatkiem uzyskały mniejszą średnią wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach dojrzewania w porównaniu z cementem referencyjnym. Podobny wynik uzyskano w przypadku cementu z 22% zawartością dachówki ceramicznej. Mniejsza wytrzymałość wczesna tych cementów nie miała jednak wpływu na wytrzymałość normową oraz późniejszą, która była zbliżona lub większa niż cementu bez dodatków. Mniejszą wytrzymałość wczesną cementów z dodatkiem ceramiki można uwzględnić w odpowiednich zaleceniach stosowania cementu w okresie zimowym oraz letnim;
 - zastosowane dodatki nie miały istotnego wpływu na wytrzymałość cementu na zginanie oraz na czas wiązania.
- Jak wynika z badań, zastosowane odpadowe cegły klinkierowe oraz dachówki ceramiczne można stosować jako częściowy zamiennik klinkieru portlandzkiego, a wspólne ich mielenie jest nowym podejściem do uzyskiwania cementów modyfikowanych. Bardziej zadowalające wyniki badań uzyskały cementy modyfikowane odpadowymi dachówkami ce-

Based on the conducted research, it is not possible to precisely indicate the processes that make it possible to replace part of the Portland cement clinker with the additive from roof tiles and ceramic bricks, but based on a review of the literature, it can be stated that these additives are also fillers.

Received: 02.06.2025
Revised: 14.07.2025
Published: 23.10.2025

ramicznymi niż cegłami klinkierowymi, ale cegły są również dobrym materiałem do produkcji cementów modyfikowanych. W przypadku obu dodatków uzyskano cementy klasy wytrzymałościowej 42,5, a więc takiej, jak klasa cementu referencyjnego.

Na podstawie przeprowadzonych badań nie można precyzyjnie wskazać procesów powodujących możliwość zastąpienia części klinkieru portlandzkiego dodatkiem odpadowych dachówek oraz cegieł ceramicznych, natomiast na podstawie przeglądu literatury można stwierdzić, że dodatki te są jednocześnie pucolanami i mikrowypełniaczami.

Artykuł wpłynął do redakcji: 02.06.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 14.07.2025 r.
Opublikowano: 23.10.2025 r.

Literature

- [1] Williams F, Yang A. Potential of Reducing CO₂ Emissions in Cement Production through Altering Clinker Compositions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2024. DOI: 10.1021/acs.iecr.4c01885.
- [2] Od ambicji do wdrożenia. The European Cement Association; Stowarzyszenie Producentów Cementu; Polish Cement Association; 2020.
- [3] Pitre V, La H, Bergerson JA. Impacts of alternative fuel combustion in cement manufacturing: Life cycle greenhouse gas, biogenic carbon, and criteria air contaminant emissions. *Journal of Cleaner Production*. 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro. 2024.143717.
- [4] Kahawalage AC, Melaen MC, Tokheim LA. Opportunities and challenges of using SRF as an alternative fuel in the cement industry. *Cleaner Waste Systems*. 2023. DOI: 10.1016/j.clwas.2022.100072.
- [5] Her S, Park J, Li P, Bae S. Feasibility study on utilization of pulverized eggshell waste as an alternative to limestone in raw materials for Portland cement clinker production. *Construct. Build. Mater*. 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126589.
- [6] Fakhri RS, Dawood ET. Limestone powder, calcined clay and slag as quaternary blended cement used for green concrete production. *Journal of Building Engineering*. 2023. DOI: 10.1016/j.job.2023.107644.
- [7] Baran T. Wykorzystanie odpadów i ubocznych produktów przemysłowych a możliwości zmniejszenia emisji CO₂ w przemyśle cementowym – badania przemysłowe. *Cement Wapno Beton*. 2021. DOI: 10.32047/CWB. 2021.26.3.1.
- [8] Wieczorek M, Pichniarczyk P. Właściwości cementu o małej zawartości klinkieru portlandzkiego, o różnej zawartości popiołu lotnego krzemionkowego i granulowanego żużla wielkopiecowego. *Cement Wapno Beton*. 2022. DOI: 10.32047/CWB. 2022.27.4.5.
- [9] Medina C, Fri'as M, De Rojas MS. Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate. *Constr. Build. Mater*. 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.075.
- [10] Torkittikul P, Chaipanich A. Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes. *Cement & Concrete Composites*. 2010. DOI: 10.1016/j.cemconcomp. 2010.02.004.
- [11] Zegardło B, Szelać M, Ogrodnik P. Ultra-high strength concrete made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes – The method of production and the interfacial transition zone. *Construct. Build. Mater*. 2016. DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2016.06.112.
- [12] Zegardło B, Halicka A. Właściwości betonu z kruszywem uzyskanym z odpadów ceramiki sanitarnej. *Przegląd Budowlany*. 2012; 11: 24 – 25.
- [13] Ogrodnik P, Zegardło B, Radzikowska M. Wykorzystanie poprodukcyjnych odpadów ceramiki sanitarnej jako napełniacza do kompozytów cementowych o wysokiej odporności chemicznej. *Przemysł Chemiczny*. 2017. DOI: 10.15199/62.2017.5.25.
- [14] Keshavarz Z, Mostofinejad D. Porcelain and red ceramic wastes used as replacements for coarse aggregate in concrete. *Construct. Build. Mater*. 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.033.
- [15] Kapelusznia E, Kotwica Ł, Pichór W, Nocuń-Wczelik W. Cementy powszechnego użytku z dodatkiem mielonego odpadu perlitu ekspandowanego. Materiały konferencyjne Dni Betonu Wisła. 13-15 października 2025.
- [16] Pichniarczyk P. Cementy z dodatkiem wapienia. *Budownictwo, technologie, architektura*. 2010; 4 (52): 62 – 63.
- [17] Taher MJ, Abed EH, Hashim MS. Using ceramic waste tile powder as a sustainable and eco – friendl cement replacement in concrete production. *Mater. Today: Proc*. 2023. DOI: 10.1016/j. matpr. 2023.04.060.
- [18] Tanash AO, Muthusamy K, Mokhtar A, Budiea A, Fauzi MA, Jokhio G, Jose R. A review on the utilization of ceramic tile waste as cement and aggregates replacement in cement based composite and a bibliometric assessment. *Cleaner Engineering and Technology*. 2023. DOI: 10.1016/j.clet. 2023.100699.
- [19] Joudah ZH, Khalid NHA, Baghban MH, Faridmehr I, Talip ARA, Hussein GF. Development sustainable concrete with high-volume wastes tile ceramic: Role of silica nanoparticles amalgamation. *Case Studies in Construction Materials*. 2024. DOI: 10.1016/j. cscm. 2024. e03733.
- [20] Kannan DM. High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement. *Constr. Build. Mater*. 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.115.
- [21] Pang L, Liang H, Zhang D, Fang K. Combining thermodynamic modeling and experiments to characterize the effect of ceramic polishing powder in cement-based materials. *Construct. Build. Mater*. 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137215.
- [22] Patel H, Arora N, Vaniya SR. Use of ceramic waste powder in cement concrete. *International Journal for Innovative Research in Science Technology*. 2015; 2 (1): 91-97.
- [23] Parashar AK, Sharma P, Sharma N. An investigation on properties of concrete with the adding of waste of ceramic and micro silica. *Mater. Today: Proc*. 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.603.
- [24] PN-EN 196-1. Metody badań cementu. Oznaczenie wytrzymałości.
- [25] PN-EN 196-6. Metody badań cementu. Oznaczenie stopnia zmielenia.
- [26] PN-EN 196-3. Metody badań cementu. Oznaczenie czasów wiązania i stałościobjętości.