

Zastosowanie mielonej stłuczki szklanej w przemysłowej produkcji betonowych elementów prefabrykowanych

Utilization of ground waste glass cullet in the industrial production of precast concrete elements

Łukasz Gołek*, Wojciech Szudek, Grzegorz Łój

AGH University of Science and Technology, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

*corresponding author: Ł. Gołek, email: golek@agh.edu.pl

Streszczenie

W pracy zweryfikowano w warunkach przemysłowych możliwość zastosowania mielonej stłuczki szklanej jako składnika spoiwa do produkcji betonowych elementów prefabrykowanych. Wpływ stłuczki na właściwości świeżych i stwardniałych betonów porównano do popiołu lotnego krzemionkowego. Ponadto zbadano możliwość zamiany części kruszywa naturalnego kruszywem betonowym z recyklingu oraz keramzytem. Wytrzymałość na ściskanie betonów, w których 25% cementu zastąpiono mieloną odpadową stłuczka szklaną była nawet o 20% większa od elementów, w których zastosowano analogiczne zastąpienie cementu popiołem lotnym krzemionkowym. W trakcie trwającego 56 dni badania nie stwierdzono spadków wytrzymałości, które mogłyby świadczyć o wystąpieniu szkodliwych efektów reakcji krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu. Zastąpienie połowy naturalnego kruszywa gruzem betonowym z recyklingu pozwoliło zmniejszyć współczynnik przewodzenia ciepła ścian o około 10%, nie wpływając przy tym negatywnie na wytrzymałość na ściskanie gotowych elementów prefabrykowanych. Zanotowano jednak pogorszenie konsystencji betonu po 30 minutach od zmieszania z wodą. Zastąpienie żwiru o uziarnieniu 2÷8 mm analogiczną frakcją keramzytu spowodowało zmniejszenie współczynnika przewodzenia ciepła o około 18%, przy zadowalającej wytrzymałości. Stwierdzono, że mielona stłuczka szklana może z powodzeniem zastępować popiół lotny krzemionkowy, w produkcji betonowych elementów prefabrykowanych.

Słowa kluczowe: beton prefabrykowany; stłuczka szklana; popiół lotny; kruszywo z recyklingu; keramzyt

Summary

In the study, a field trial was carried out to evaluate the applicability of ground waste glass cullet as a binder component, in the industrial production of precast concrete elements. The influence of glass cullet addition on the properties of fresh and hardened concretes was compared to siliceous fly ash. Moreover, the effects of a partial substitution of the natural aggregate with recycled concrete and expanded clay aggregate were determined. The compressive strength of concretes, in which 25% of cement was substituted with ground waste glass cullet, was even 20% higher compared to elements with an analogous addition of siliceous fly ash. Over 56 days, no drops in strength related to the harmful effects of the alkali-silica reaction were observed. Replacing half of the natural aggregate with graded recycled concrete aggregate, allowed to lower the thermal conductivity of the walls by approx. 10%, with no negative impact on the compressive strength of precast elements. However, a decrease in the consistency of fresh mix was observed after 30 minutes. Replacing the 2÷8 mm gravel with the same fraction of expanded clay resulted in an approx. 18% decrease in thermal conductivity, while maintaining satisfactory mechanical properties. It was concluded that ground waste glass cullet can be successfully used as a fly ash replacement in the production of precast concrete elements.

Keywords: precast concrete; waste glass; fly ash; recycled aggregate; expanded clay

1. Wprowadzenie

Produkcja cementu w Polsce, wg. danych Głównego Urzędu Statystycznego (1), od kilku lat utrzymuje się na rekordowym poziomie

1. Introduction

According to Statistics Poland (1), for the last couple of years, the annual domestic production of cement maintained in a record level

ok. 18 mln ton rocznie. Na wynik ten nie wpłynęła negatywnie nawet sytuacja epidemiologiczna i związane z nią czasowe zamknięcie granic w 2020 roku (2). Zdolności produkcyjne polskiego przemysłu cementowego są jeszcze większe i wynoszą 22-24 mln ton, co oznacza, że w przypadku pojawienia się impulsu ze strony gospodarki, produkcja może się dodatkowo zwiększyć (3). Jednocześnie globalne dążenie do obniżania emisji CO₂, szczególnie na terenie Unii Europejskiej, której państwa członkowskie mają osiągnąć neutralność klimatyczną do 2050 roku (4), a także zwiększające się rynkowe ceny unijnych uprawnień do emisji dwutlenku węgla, przekraczające już 40 euro za tonę (5) sprawiają, że coraz popularniejsze stają się cementy o zmniejszonej zawartości klinkieru portlandzkiego. Cementy te, zgodnie z normą PN-EN 197-1:2012, zawierać mogą szereg dodatków mineralnych, między innymi granulowany żużel wielkopiecowy, pył krzemionkowy oraz popiół lotny krzemionkowy i wapienny. Ważną rolę dodatków mineralnych potwierdza zastosowanie w 2017 roku w procesach wytwarzania cementu i klinkieru ok. 1,5 mln ton popiołów lotnych i ok. 2 mln ton żużla wielkopiecowego. Cementy rodzajów CEM II-V stanowią natomiast już ponad 50% krajowej produkcji tych spoiw (6).

Mechanizm działania powszechnie wykorzystywanych dodatków mineralnych, takich jak granulowany żużel wielkopiecowy czy popiół lotny krzemionkowy oraz ich wpływ na mikrostrukturę i właściwości kompozytów cementowych został dobrze zbadany i opisany w literaturze (7). Ich stosowanie w technologii cementu i betonu uznawane jest więc za bezpieczne, a długoterminowe właściwości gotowych wyrobów – za przewidywalne. Szczególnie ceniony jest korzystny wpływ tych dodatków na odporność na korozję chemiczną zapraw i betonów, który wynika ze zmniejszenia ich przepuszczalności poprzez zwiększenie zagęszczenia mikrostruktury oraz zmniejszenia w matrycy cementowej zawartości wodorotlenku wapnia – najbardziej podatnego na korozję produktu hydratacji. Surowce te stają się jednak coraz trudniej dostępne. Zjawisko to widoczne jest zarówno w skali krajowej, jak i ogólnoeuropejskiej. Odchodzenie od energetyki węglowej na rzecz odnawialnych źródeł energii oraz zastępowanie konwencjonalnych kotłów w elektrowniach kotłami fluidalnymi sprawia, że produkcja popiołu lotnego jest coraz mniejsza, a jego ceny – coraz wyższe (8). Zamykanie funkcjonujących od lat hut stali ma natomiast wpływ na zmniejszenie ilości wytwarzanego granulowanego żużla wielkopiecowego (9). Malejąca dostępność popiołów i żużli sprawia, że przemysł cementowy zaczyna poszukiwać nowych dodatków mineralnych, które mogłyby je zastąpić.

W ostatnich latach opublikowanych zostało bardzo wiele prac badawczych opisujących korzystne właściwości nowych, nieujętych dotychczas w normach dodatków mineralnych do cementów. Wśród nich wymienić można na przykład mielony odpad perlitu ekspandowanego (10-17), popioły ze spalania łusek i słomy ryżowej (18-21), mieloną gezę wapienną (22-23), pył marmurowy (24) czy popioły ze spalarni odpadów komunalnych (25-28). Dużo uwagi poświęca się również alkalicznie aktywowanym spoiwom złożonym z odpadowych lub syntetycznych dodatków mineralnych i szkieł (29-37). Potencjał aplikacyjny wielu z tych surowców jest jednak ograniczony z uwagi na ich małą dostępność, wynikającą

of approx. 18 million tonnes, even despite the COVID-19 pandemia and the related closure of borders in 2020 (2). The manufacturing capacity of the Polish cement industry is even greater and amounts to 22-24 million tonnes. Thus, the production can be easily increased in response to a growing market demand (3). At the same time, the global trend to reduce the CO₂ emissions, especially in the EU, whose Member States aim to be climate-neutral by 2050 (4), combined with growing trading prices of CO₂ emission allowances, already exceeding 40 EUR per tonne (5) result in a growing popularity of cements characterized by a reduced Portland clinker content. These cements, according to the PN-EN 197-1:2012 standard, may contain a number of mineral additives, including granulated blast furnace slag, silica dust and siliceous or calcareous fly ash. The important role of mineral additives is emphasized that in 2017 in Poland, approx. 1.5 million tonnes of fly ash and approx. 2 million tonnes of the blastfurnace slag were used in cement and clinker manufacturing processes. CEM II-V type cements accounted for over 50% of the overall domestic production (6).

The action mechanism of commonly used mineral additives, such as granulated blast furnace slag or siliceous fly ash and their influence on the microstructure and properties of cement composites has been well researched and described in the literature (7). Therefore, their use in cement and concrete technology is considered safe and the long-term properties of the composites are usually predictable. Particularly appreciated is the beneficial effect of these additives on the chemical corrosion resistance of mortars and concretes, which results from both the formation of a less permeable, denser microstructure and a lower content of calcium hydroxide - the most corrosion-susceptible hydration product present in the matrix. However, the supply of the above-mentioned mineral additives is dwindling on both national and European scale. Reducing the output of coal-fired power plants in favor of renewable energy sources and replacing conventional boilers with fluidized bed ones contribute to the dropping production and growing market prices of fly ash (8). At the same time, closing down steelworks that have been operating for years decreases the production of granulated blastfurnace slag (9). The decreasing supply of fly ash and slag forces the cement industry to look for new mineral additives that could potentially be used as their replacement.

In recent years, numerous studies have been published describing the beneficial properties of new, previously unrealized mineral cement additives. They are including e.g. ground waste expanded perlite (10-17), rice husk and straw ashes (18-21), ground limestone (22-23), marble dust (24) or municipal waste incinerator bottom ashes (25-28). A great deal of attention is also paid to alkali-activated binders, based on waste or synthetic mineral additives and glasses (29-37). However, the application potential of many of these raw materials is limited due to their poor availability, resulting from their relatively low production or only local occurrence. Especially in the case of some of the ashes, due to significant differences in chemical composition, depending on the source and batch of the material (25). In comparison with these additives, waste glass cullet is characterized by exceptionally good properties. The material is available globally in large quantities – clear glass

z relatywnie niewielkiej produkcji lub wyłącznie lokalnego występowania. Również, szczególnie w przypadku niektórych popiołów, ze względu na znaczne różnice w składzie chemicznym w zależności od źródła i partii materiału (25). Na tym tle wyjątkowo korzystnie prezentuje się odpadowa stłuczka szklana. Materiał ten dostępny jest globalnie w dużych ilościach – recyklingowi poddaje się bowiem głównie stłuczkę bezbarwną, natomiast stłuczka zanieczyszczona chemicznie, np. jonami barwiącymi czy metalami ciężkimi, z uwagi na utrudnione przetwórstwo, jest w większości składowana na hałdach (40-43). Ponadto odpadowa stłuczka szklana zawiera, podobnie do tradycyjnych dodatków mineralnych, dużą ilość reaktywnej, amorficznej krzemionki, a w zależności od pochodzenia szkła i jego wcześniejszego zastosowania może wykazywać małą zmienność składu chemicznego (42).

Możliwość wykorzystania stłuczki szklanej w roli kruszywa do produkcji zapraw i betonów badano już w latach 60. i 70. XX wieku (46-47). Przeszkodą okazała się być jednak wówczas duża zawartość reaktywnej krzemionki i alkaliów, które na etapie produkcji wprowadza się do masy szklarskiej, w celu obniżenia jej temperatury topnienia. Stwierdzono, że w warunkach panującego w kompozytach cementowych dużego pH i pod wpływem wilgoci dochodzi do reakcji znajdującej się w kruszywie bezpostaciowej krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu, produktem której jest ekspansywny żel (38-51). Jej konsekwencją jest powstawanie w matrycy mikrospękań i spadek wytrzymałości mechanicznej materiału (7). Pokłosiem tych obserwacji była panująca przez lata powszechna opinia, że stosowanie odpadowej stłuczki szklanej do produkcji betonów jest obciążone bardzo dużym ryzykiem wystąpienia ekspansji.

Do problemu powrócono na przełomie wieków. Podjęto wówczas liczne badania nad możliwością zastosowania odpadowej stłuczki szklanej jako dodatku do cementu. W efekcie stwierdzono, że zmielenie stłuczki hamuje reakcję krzemionka-alkalia, a uzyskany materiał zaczyna przejawiać właściwości pucolanowe (38-45, 48-52). Na podstawie przywołanych prac trudno jest jednoznacznie określić graniczne uziarnienie, powyżej którego zachodzi reakcja aktywnej krzemionki z kruszywa z wodorotlenkami sodu i potasu, ponieważ reaktywność konkretnej stłuczki zależy także od jej składu chemicznego (45). Większość autorów powołuje się na prace (39) i (49), w których jako graniczną średnicę ziaren podano 300 μm . Znaleźć można jednak również prace, w których za bezpieczne uznano stosowanie stłuczki o większym uziarnieniu, na przykład do 1 mm (38). Nie ulega natomiast wątpliwości, że im drobniejsza stłuczka, tym większa jest jej aktywność pucolanowa (39, 42-44, 49). Co ciekawe, wielu badaczy stwierdziło, że dodanie do cementu bardzo drobno zmielonej stłuczki o uziarnieniu w przedziale 0-75 μm powoduje, podobnie jak dodatek żużła, popiołu lotnego czy pyłu krzemionkowego (7), zmniejszenie ekspansji zapraw i betonów w stosunku do próbek wzorcowych, pozbawionych dodatków. Zapobiega także niszczeniu materiału w przypadku, gdy próbka zawiera kruszywo reaktywne (38-39, 42, 44-45, 49, 51). Poprawie ulega również odporność na korozję chemiczną, między innymi chlorkową (42, 45, 51-52). Pod kątem właściwości użytkowych mielona stłuczka zachowuje się podobnie do popio-

is usually recycled, while the chemically contaminated cullet (e.g. with coloring ions or heavy metals), due to difficult processing, is mostly dumped in landfills (40-43). In addition, waste glass cullet, similarly to the traditional mineral additives, contains a large amount of reactive, amorphous silica and, depending on the origin of the material and its previous use, its chemical composition can be relatively stable (42).

The applicability of crushed glass waste as an aggregate in the production of mortars and concretes was already investigated in the 1960s and 70s (46-47). However, such use was impossible due to the high content of alkali oxides, which are introduced during the production of glass, in order to lower its melting point. It was found that in high pH, typical for cement composites and in the presence of moisture, the amorphous silica leached from the aggregate reacts with sodium and potassium hydroxides, in the so-called ASR reaction, forming a highly expansive gel (38-51). The reaction leads to the formation of microcracks in the matrix and a decrease in the mechanical strength of the material (7). Due to these observations, a common opinion prevailed over the years that the use of waste glass in the production of concrete is presenting a very high risk of alkali corrosion.

The problem was revived at the turn of the century, when numerous studies were carried out to evaluate the applicability of waste glass cullet as a cement additive. As a result, it was determined that grinding of the cullet inhibits the alkali-silica reaction and grants to the material good pozzolanic properties (38-45, 48-52). Based on the cited references, it is difficult to clearly define the glass particle diameter above which the ASR reaction takes place because the alkali reactivity of a specific cullet depends not only on size, but also on its chemical composition (45). Most authors refer to the (39) and (49) papers, where 300 μm was given as the limiting grain diameter. However, in other works it was considered safe to use a coarser cullet, for example with a maximum diameter of 1 mm (38). Undoubtedly, the finer the cullet, the greater its pozzolanic activity (39, 42-44, 49). Interestingly, many researchers found that using a finely ground glass cullet, with a particle size distribution in the range of 0-75 μm , as a cement additive results, similarly to the addition of slag, fly ash or silica fume (7), in a reduction of the expansion of mortars and concretes, in comparison to the reference samples with no additives. Moreover, it also prevents the ASR reaction if the sample contains an alkali reactive aggregate (38-39, 42, 44-45, 49, 51). The resistance to chemical corrosion, including chloride corrosion, is also improved (42, 45, 51-52). The performance of ground waste glass cullet is similar to fly ash (39-44, 49-50) - its use as a cement substitute increases the consistency of mortars and concretes and is decreasing the early compressive strength of the composites. In most of the cited works, after longer hydration periods, the compressive strength, typically for pozzolanic additives, exceeds that reported for the reference samples. The increase was in the range of 5-60%, depending on the content of the additive and the type of binder/aggregate used. The pozzolanic reaction can also be accelerated by curing the samples at elevated temperatures (39, 43). However, some studies indicate a reduction in the long-term compressive strength

łów lotnych (39-44, 49-50) – jej wprowadzenie w miejsce części cementu powoduje pogorszenie konsystencji zapraw i betonów oraz zmniejszenie wczesnej wytrzymałości na ściskanie. W większości z cytowanych prac wytrzymałość po dłuższych okresach dojrzewania, wytrzymałość z materiałów z dodatkami pucolanowymi jest większa niż próbek wzorcowych. Wzrost ten mieścił się w przedziale 5-60%, w zależności od procentowej zawartości dodatku i zastosowanego spoiwa/kruszywa. Reakcję pucolanową można również przyspieszyć przeprowadzając dojrzewanie próbek w podwyższonej temperaturze (39, 43). Część badań wskazuje jednak na obniżenie długoterminowej wytrzymałości na ściskanie kompozytów ze słuczką w porównaniu do próbek odniesienia, szczególnie gdy dodatek zastępuje cement portlandzki w ilości większej niż 10% masy cementu (42-44, 51). Shayan (45) przeprowadził aplikacyjne badania na trzech seriach płyt betonowych, w których 0, 20 i 30% masy cementu portlandzkiego zostało zastąpione mieloną słuczką szklaną przy zachowaniu stałego wskaźnika wodno-cementowego. Dla próbki zawierającej 20% słuczki w spoiwie wytrzymałość na ściskanie po 90 dniach była o ok. 18% mniejsza od próbki odniesienia. Po 404 dniach tendencja uległa jednak odwróceniu – wytrzymałość betonu z tej serii była o ok. 10% większa od próbki odniesienia i osiągnęła blisko 60 MPa. Przy trzydziestoprocentowej zamianie cementu słuczką wytrzymałość na ściskanie po 90 dniach była o ok. 30% mniejsza od wzorcowej, a jej wartość końcowa po 404 dniach wynosiła 40 MPa. Gołek w jednej ze swoich prac (43) zbadał wpływ stopnia zmielenia odpadowej słuczki szklanej na wytrzymałość na ściskanie zapraw dojrzewających przez rok w temperaturze pokojowej. Zamiana cementu portlandzkiego słuczką o najgrubszym badanym uziarnieniu [do 200 μm] i powierzchni właściwej 3000 cm^2/g wg Blaine'a skutkowała po roku wyraźnym spadkiem wytrzymałości na ściskanie względem próbki referencyjnej. Zjawisko zaobserwowano nawet, gdy zawartość dodatku wynosiła zaledwie 5% spoiwa. Dla słuczki zmielonej do powierzchni 4000 i 5000 cm^2/g wytrzymałość po 360 dniach była jednak wyraźnie większa od próbki odniesienia, a największe wartości uzyskano dla zapraw, w których zamiana cementu słuczką sięgała 35%. Co więcej, dla najdrobniej zmielonego materiału, którego uziarnienie w badaniu granulometrycznym nie przekraczało 70 μm , pierwsze oznaki reakcji pucolanowej zaobserwowano już po 28 dniach. Podkreśla to, jak istotny wpływ ma odpowiednio drobne zmielenie słuczki na szybkość przyrostu wytrzymałości zapraw i betonów. W innej swojej pracy (48) autor badał spoiwa na bazie mielonej słuczki oraz popiołu lotnego wapiennego z fluidalnego spalania. W kilku seriach uzyskano zaczyny charakteryzujące się zadowalającą wytrzymałością mechaniczną, nieulegającą spadkowi na przestrzeni 6 lat dojrzewania. Występującą w niektórych przypadkach ekspansję udało się natomiast powiązać ze składem chemicznym próbek - stosunkiem tlenków $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$. Aktualnie w fazie publikacji są wyniki trwających 10 lat badań na zaprawach, w których różne ilości cementu portlandzkiego zastępowano mieloną słuczką szklaną. Uzyskane wyniki są pozytywne – w trakcie wieloletnich pomiarów nie stwierdzono zmniejszenia wytrzymałości.

of composites containing waste glass cullet, especially when the substitution of cement exceeds 10% by mass (42-44, 51). Shayan (45) conducted on three series of concrete slabs, in which 20 and 30 mass% of Portland cement was replaced with ground waste glass cullet, while maintaining a constant water-cement ratio. After 90 days of curing, the compressive strength of the sample containing 20% of cullet in the binder was approx. 18% lower than that recorded for the reference concrete. However, after 404 days, the trend was reversed - the compressive strength of the same series of concretes was approx. 10% higher than the reference, reaching nearly 60 MPa. Substituting 30% of cement with waste glass cullet resulted in an approx. 30% decrease in strength after 90 days of curing, compared to the reference sample. After 404 days, the final value reached 40 MPa. In one of his works, Gołek (43) studied the impact of waste glass cullet grinding degree on the compressive strength of mortars, cured at room temperature for 1 year. Substituting Portland cement with the coarser tested cullet, characterized by a maximum grain size of 200 μm and a specific surface area of 3000 cm^2/g , determined by Blaine method resulted in a significant drop in compressive strength, compared to the reference sample. The effect was observed even at the lowest content of the additive, equal to 5% of the binder mass. For the cullet ground to the area of 4000 and 5000 cm^2/g , after 360 days the strength was clearly higher than for the reference sample, with the highest values obtained for mortars characterized by the highest cement substitution equal 35% by mass. Moreover, for the finest cullet, with a particle size below 70 μm , the first pozzolanic reactions were observed after 28 days. This emphasizes the significant influence of glass cullet grinding degree on the strength development of mortars and concretes. In his other work (48), the author investigated binders based on ground waste glass cullet and calcareous fly ash from fluidized bed combustion. Several series of pastes were obtained, characterized by satisfactory mechanical strength that did not decline over 6 years of curing. Furthermore, the expansion measured for some of the samples was clearly correlated with their chemical composition - the $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio. A longer, 10-year study of mortars in which various amounts of Portland cement were replaced with ground waste glass cullet, is currently in the publication phase. The results are positive - no drops in strength were found over many years of measurements.

In the light of presented literature reports and favorable results of previous studies, the authors decided to develop an industrial production technology of large precast concrete elements, based on a cementitious binder containing ground waste glass cullet. Furthermore, in order to maximize the use of secondary raw materials in line with the sustainable development policy, the applicability of an aggregate consisting of processed concrete production waste, additionally supplemented with selective demolition rubble, was investigated. The use of recycled concrete aggregate has been described in the PN-EN 206+A1:2016-12 standard, as well as in numerous studies (53-58). Both the standard and some of the cited literature discourage the use of the 0+4 mm fraction due to its high water demand and the resulting rapid decrease in the workability of concrete mixes. However, contrary to these guidelines, the authors

W świetle korzystnych wyników uprzednio prowadzonych badań oraz przedstawionych doniesień literaturowych, autorzy podjęli się opracowania przemysłowej technologii produkcji wielkogabarytowych prefabrykatów betonowych ze spoiwa cementowego z dodatkiem mielonej stłuczki szklanej. Dodatkowo, aby zgodnie z polityką zrównoważonego rozwoju zmaksymalizować wykorzystanie surowców wtórnych, zbadano możliwość zagospodarowania w formie kruszywa gruzu betonowego pochodzącego z przeróbki odpadów produkcyjnych, uzupełnionego dodatkowo gruzem z selektywnej rozbiórki. Zastosowanie kruszywa betonowego z recyklingu zostało opisane w obowiązującej normie PN-EN 206+A1:2016-12 oraz w licznych publikacjach naukowych (53-58). Zarówno norma, jak i część przytoczonej literatury odradza stosowanie frakcji 0÷4 mm z uwagi na dużą wodożądność i wynikający z niej spadek urabialności mieszanek betonowych w czasie. Wbrew tym wskazówkom, w roli podstawowego składnika zdecydowano się jednak wykorzystać kruszywo recyklingowe o uziarnieniu ciągłym 0÷16 mm. Przyjęto bowiem założenie, że w technologii prefabrykacji mieszanka betonowa układana i zagęszczana będzie w formie w bardzo krótkim czasie, z reguły nieprzekraczającym 10 minut, co przy zastosowaniu odpowiednich dodatków mineralnych i domieszek chemicznych, a także prawidłowych zabiegów technologicznych, a przede wszystkim kolejności i czasu mieszania, pozwoli na zachowanie odpowiednich właściwości roboczych mieszanki w założonym czasie.

2. Wstępne badania laboratoryjne

2.1. Materiały i metody

Jako składniki spoiwa wykorzystano: cement portlandzki CEM I 42,5R, popiół lotny krzemionkowy oraz odpadową stłuczkę szklaną, zmieloną do powierzchni 4200 cm²/g wg Blaine'a. Skorzystano z dwóch metod określenia składu chemicznego surowców – klasycznej analizy chemicznej, zalecanej przez normę PN-EN 196-2:2013-11 oraz rentgenowskiej spektroskopii fluorescencyjnej.

W celu oceny przydatności kruszywa z recyklingu do produkcji prefabrykatów betonowych, jego właściwości porównano ze stosowanym tradycyjnie kruszywem żwirowym. Na rys. 1 przedstawiono krzywe uziarnienia kruszywa naturalnego dostosowanego do potrzeb prefabrykacji oraz kruszywa z gruzu betonowego, o uziarnieniu ciągłym.

Dla badanych kruszyw przeprowadzono również ocenę wybranych właściwości fizycznych, ważnych z punktu widzenia opracowywanej technologii prefabrykacji. Ponieważ zgodnie z normą niektóre parametry należało

decydować użyć do produkcji kruszywa z recyklingu jako podstawowego składnika. Zakładano, że w technologii wylewania, mieszanka betonowa będzie wlewana do formy i zagęszczana w bardzo krótkim czasie, zwykle w ciągu 10 minut. Dzięki zastosowaniu odpowiednich dodatków mineralnych i mieszanek chemicznych, a także właściwym metodą, takim jak dodawanie składników w określonej kolejności i dostosowanie czasu mieszania, można było zachować żądaną roboczość mieszanki przez wymagany czas.

2. Preliminary laboratory study

2.1. Materials and methods

Ordinary Portland cement CEM I 42.5R, siliceous fly ash and waste glass cullet ground to a specific surface area of 4200 cm²/g, determined by Blaine's method, were used as the components of the binder. The chemical composition of raw materials was determined by both traditional chemical analysis, recommended by the PN-EN 196-2:2013-11 standard, and X-ray fluorescence spectroscopy [XRF].

In order to evaluate the applicability of the recycled concrete aggregate in the production of precast elements, its properties were compared with the traditionally used gravel aggregate. Fig. 1 shows the grading curves of the natural aggregate blend optimized for precast concrete manufacturing and the recycled concrete aggregate.

Selected physical properties of the aggregates, significant for the developed casting technology, were determined. According to the standard, some parameters had to be determined only for coarse aggregate. Then, for the purposes of the measurements presented in Table 2, the recycled concrete aggregate was divided into 0÷4 and 4÷16mm fractions.

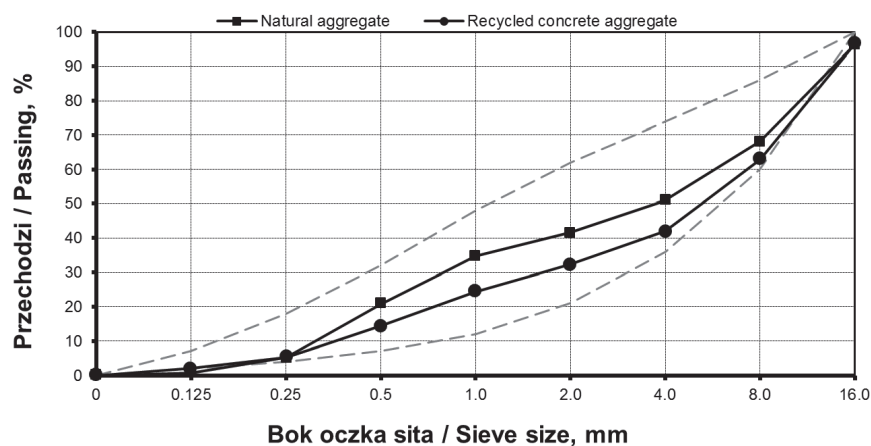
The obtained results indicate that the recycled concrete aggregate can be successfully used in the production of precast concrete

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY CEMENTU I DODATKÓW

CHEMICAL COMPOSITION OF CEMENT AND ADDITIVES

Składnik Component	Zawartość, % / Content, %		
	CEM I 42,5R	Odpadowa stłuczka szklana Waste glass cullet	Popiół lotny krzemionkowy Siliceous fly ash
Straty prażenia/LOI	4.3	0.5	5.2
CaO	49.5	10.6	15.5
SiO ₂	26.3	67.2	38.4
Al ₂ O ₃	10.7	2.2	19.7
Fe ₂ O ₃	4.2	0.7	8.2
MgO	1.5	1.6	3.2
K ₂ O	1.2	0.4	1.6
Na ₂ O	0.8	16.5	1.1
SO ₃	4.3	0.8	2.9
Cl-	0.13	0.05	0.10



Rys. 1. Krzywe uziarnienia stosu okruszowego z kruszywa naturalnego oraz kruszywa z recyklingu

Fig. 1. Particle size distribution curves of the natural aggregate blend and the recycled concrete aggregate

oznaczyć wyłącznie dla grubego kruszywa recyklingowego, na potrzeby zaprezentowanych w tabelicy 2 pomiarów zostało ono rozdzielone na frakcje 0÷4 i 4÷16 mm.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że kruszywo z recyklingu może być stosowane do produkcji prefabrykatów betonowych. Cechowała je lepsza od kruszywa naturalnego ciągłość składu ziarnowego, co powinno powodować mniejszą jamistość i większą szczelność niż w przypadku stosu okruszowego z kruszyw żwirowych. Kruszywo z gruzu budowlanego miało ponadto mniejszy wskaźnik płaskości frakcji najgrubszych, co odgrywa dużą rolę w procesie zagęszczania mieszanek betonowych pomiędzy prętami zbrojenia.

W oparciu o uzyskane dane surowców zaprojektowano składy mieszanek betonowych, wzorując się na składach stosowanych przez krajowych wytwórców prefabrykatów wielkoformatowych. Ze względu na specyfikę kruszyw recyklingowych zrezygnowano z projektowania typowych betonów samozagęszczających

Tablica 2 / Table 2

WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI KRUSZYW

SELECTED PROPERTIES OF THE AGGREGATES

Właściwość / Property	Kruszywo naturalne / Natural aggregate			Kruszywo z recyklingu / Recycled concrete aggregate		Keramzyt / Expanded clay aggregate
	Piasek / Sand, 0÷2 mm	Żwir / Gravel, 2÷8 mm	Żwir / Gravel, 8÷16 mm	0÷4 mm	4÷16 mm	4-8 mm
Gęstość objętościowa / Bulk density [ρ_a], g/cm ³	2,67	2,63	2,63	2,47	2,53	1,15
Nasiąkliwość / Water absorption [WA_{24}], %	0,33	1,43	1,61	4,18	4,71	18,52
Mrozoodporność / Freeze-thaw resistance [F_{25}], %	-	0,85±0,24	0,36±0,04	-	1,56±0,14	-
Wskaźnik płaskości / Flakiness index [FI], %	-	5	14	-	6	1

elements. Its gradation was better than the gradation of natural aggregate, which should result in a lower amount of voids and a better packing density than in the case of the natural gravel aggregate blend. The recycled aggregate has also a more cubic shape [lower flakiness index] of the coarse fraction grains, which plays a significant role in compacting the fresh concrete mix between the reinforcement bars.

Based on the obtained properties of the raw materials, concrete mixes were designed, following the recipes used by domestic manufacturers of the large-scale precast elements. Due to the specificity of the recycled concrete aggregate, the idea of designing typical self-compacting concretes, characterized by a slump flow higher than 55 cm, was abandoned as the variable water absorption of the aggregate would not

allow to maintain a long-term production regime and rheological homogeneity of the mixtures. The authors decided to design low compaction energy concretes, also known as "almost self-compacting concretes" [ASCCs], characterized by slump flow values in the range of 44 - 55 cm and high viscosity. Three aggregate blends were selected:

- **A** – 100% graded gravel aggregate,
- **B** – 50% graded gravel aggregate mixed with 50% recycled concrete aggregate,
- **C** – a blend based on the graded gravel aggregate, in which the 4÷8 mm fraction was substituted with expanded clay aggregates, of the same granulation.

The particle size distribution curves of the aggregate blends are shown in Fig. 2.

The compositions were compiled following the principles typically used in the design of self-compacting concretes. Despite the relatively low required strength class of concrete i.e. C20/25, in order to obtain appropriate rheological parameters, approx. 450

się o rozplywie stożka powyżej 55 cm według PN-EN 12350-8:2019-08, ponieważ zmienna nasiąkliwość kruszywa z gruzu betonowego nie pozwoliłaby w przyszłości na utrzymanie reżimu produkcyjnego i jednorodności reologicznej mieszanek. Zdecydowano się na opracowanie betonów o małym zapotrzebowaniu na energię zagęszczania, zwanych również „prawie samozagęszczalnymi” (z angielskiego ASCC – almost self-compacting concretes). Rozplyw stożka takich mieszanek mieści się w przedziale 44 – 55 cm i mają one dużą lepkość. Dobrano trzy stopy okruchowe o następującym składzie:

- **A** – stos okruchowy zawierający 100% zoptymalizowanego kruszywa żwirowego,
- **B** – stos okruchowy zawierający 50% zoptymalizowanego kruszywa żwirowego i 50% kruszywa betonowego z recyklingu,
- **C** – stos okruchowy ze zoptymalizowanego żwiru, w którym frakcję 4÷8 mm zastąpiono w całości keramzytem, o takim samym uziarnieniu.

Krzywe uziarnienia stosów okruchowych A, B i C przedstawiono na rysunku 2.

Przy zestawianiu składów przyjęto zasady wykorzystywane w projektowaniu betonów samozagęszczalnych. Pomimo wymaganej stosunkowo małej klasy wytrzymałości betonu C20/25, dla uzyskania dobrych właściwości reologicznych do przygotowania mieszanek użyto ok. 450 kg/m³ mieszanek spoiwowych składających się minimum z 340 kg/m³ cementu portlandzkiego klasy 42,5R oraz dodatków mineralnych, a mianowicie popiołu lotnego krzemionkowego i mielonej odpadowej stłuczki szklanej.

Przyjęto następujące proporcje składników spoiwa:

- 1 – cement:dodatek ≈ 3:1 – jako dodatek zastosowano 100% popiołu lotnego krzemionkowego,
- 2 – cement:dodatek ≈ 3:1 – jako dodatek zastosowano 100% mielonej odpadowej stłuczki szklanej,
- 3 – cement:dodatek ≈ 3:1 – jako dodatek mieszaninę składającą się z 50% popiołu lotnego krzemionkowego i 50% mielonej odpadowej stłuczki szklanej.

Powyższe 3 spoiwa zestawiono z wcześniej opisanymi wariantami stosów okruchowych, uzyskując 9 składów mieszanek betonowych. Przyjęto stosunek wodno-spoiwowy $w/s \leq 0,36$. W celu uzyskania właściwego rozplywu mieszanek zastosowano dodatek superplastyfikatora w ilości nie większej niż 0,8 – 0,9% w stosunku do masy całości spoiwa.

Na podstawie opracowanych składów przygotowano w mieszarce laboratoryjnej zaroby o objętości około 50 litrów. Aby wyrównać warunki wilgotnościowe, wszystkie kruszywa zostały wysuszone, a następnie równomiernie nawilżone poprzez trwające 120 sekund mieszanie wstępne z połową wody zarobowej. Dla każdej z mie-

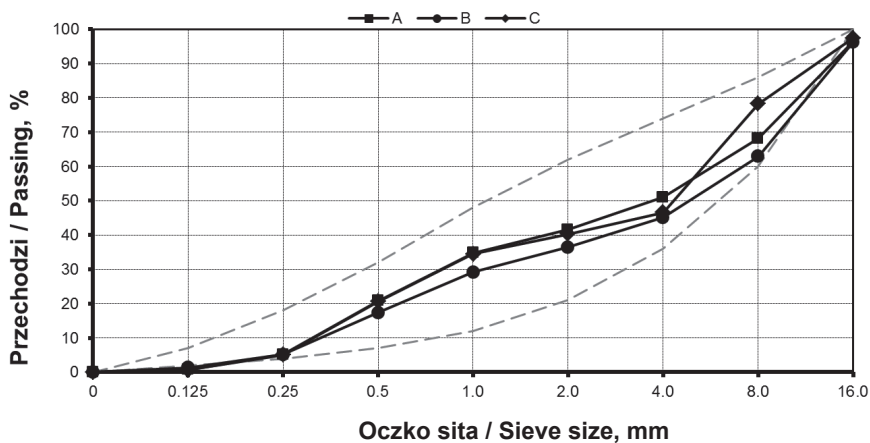


Fig. 2. Particle size distribution curves of A, B and C aggregate blends

Rys. 2. Krzywe uziarnienia stosów okruchowych A, B i C

kg/m³ of binders. It was containing at least 340 kg/m³ of CEM I 42.5R Portland cement combined with mineral additives: fly ash and ground waste glass cullet, were introduced into the mixtures.

The following proportions of binder components were adopted:

- 1 – cement : additive ≈ 3:1 - 100% siliceous fly ash was used as the additive,
- 2 – cement : additive ≈ 3:1 - 100% ground waste glass cullet was used as the additive,
- 3 – cement : additive ≈ 3:1 - the additive blend consisted of 50% siliceous fly ash and 50% ground waste glass cullet.

The three binders were connected with previously described aggregate blends, giving a total of 9 concrete compositions. A water-binder ratio ≤ 0.36 was assumed. In order to obtain the desired flow of fresh concrete mixtures, superplasticizer was used of up to 0.8 - 0.9%, in relation to the total mass of the binder.

Following the developed mix proportions, batches of approx. 50 dm³ of each concrete were prepared, in a laboratory mixer. All aggregates were dried in order to control their moisture content and then evenly moistened by pre-mixing for 120 seconds with half of the mixing water. For each of the concretes, the slump was measured immediately after mixing and then after 10 and 30 minutes. Density and air content were also determined. Cubic samples were formed with the dimensions of 150 mm x 150 mm x 150 mm. The samples were demoulded after 24 hours and cured in water at 20°C. After 2, 28 and 56 days of hydration, the compressive strength of the concretes was measured. Additional samples were prepared in B2 and B3 series. After 6 hours from moulding, they were subjected to steaming: for 8 hours at 45°C or for 6 hours at 60°C [the heating time was 2 hours and the cooling time was 3 hours]. Their mechanical strength was measured after 2 and 28 days of curing. All laboratory work was carried out according to the guidelines found in the adequate standards (59-62).

2.2. Results and discussion

The properties of fresh concrete mixes are presented in Table 3. Both the flow and the air content of all mixes were in the assumed

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK BETONOWYCH

PROPERTIES OF FRESH CONCRETE MIXES

Mierzona właściwość / Properties	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Rozpływ stożka po zmieszaniu / Slump flow after mixing, cm	52	52	55	46	48	49	48	48	49
Rozpływ stożka po 10 minutach / Slump flow after 10 minutes, cm	52	51	54	46	46	47	48	48	48
Rozpływ stożka po 30 minutach / Slump flow after 30 minutes, cm	49	50	53	39	38	42	41	40	44
Gęstość / Density, kg/m ³	2348	2350	2352	2215	2150	2180	1891	1888	1902
Zawartość powietrza / Air content, %	3.7	3.5	3.5	3.5	3.7	3.5	3.5	3.2	3.4

szanek oznaczono rozpływ bezpośrednio po zmieszaniu z wodą oraz po 10 i 30 minutach, a także zmierzono gęstość objętościową i procentową zawartość powietrza. Następnie zaformowano kostki o wymiarach 150 mm x 150 mm x 150 mm. Próbkę zostały rozformowane po upływie 24 godzin, a następnie pozostawione do dojrzewania w wodzie, w temperaturze 20°C. Po 2, 28 i 56 dniach hydratacji zbadano ich wytrzymałość na ściskanie. W seriach B2 i B3 przygotowano również dodatkowe kostki, które po 6 godzinach od zaformowania poddano naparzeniu: przez 8 godzin w temperaturze 45°C lub przez 6 godzin w temperaturze 60°C. Czas ogrzewania wynosił 2 godziny, a czas studzenia – 3 godziny. Ich wytrzymałość zbadano po 2 i 28 dniach dojrzewania. Wszystkie prace laboratoryjne prowadzono zgodnie z wytycznymi zawartymi w odpowiednich normach (61-64).

2.2. Wyniki i dyskusja

Wyniki badań mieszank betonowych przedstawiono w tablicy 3. Rozpływ i zawartość powietrza wszystkich mieszank mieściły się w przyjętych założeniach. W przypadku próbek zawierających kruszywo z recyklingu oraz keramzyt odnotowano jednak, zgodnie z przewidywaniami, wyraźne pogorszenie urabialności po upływie 30 minut.

Zmierzone wartości wytrzymałości na ściskanie zaprezentowano w tablicy 4. Uzyskane wyniki były zadawalające z punktu widzenia właściwości użytkowych planowanych prefabrykatów betonowych. Zastąpienie części kruszywa naturalnego keramzytem spowodowała zmniejszenie wytrzymałości, wynoszące po 56 dniach odpowiednio 17, 28 i 24% dla betonów zawierających spoiwo 1, 2 i 3. Wyniki uzyskane dla mieszank, w których połowę kruszywa zastąpiono betonowym gruzem z recyklingu były natomiast porównywalne do próbek wzorcowych, zawierających w swoim składzie wyłącznie kruszywo żwirowe. Oznacza to, że zastosowanie w pro-

range. However, as expected, in the case of samples containing recycled concrete aggregate and expanded clay aggregates, a major decrease in workability was found after 30 minutes.

The measured values of compressive strength are presented in Table 4. The obtained results were satisfactory from the application point of view. Substituting part of the natural aggregate with expanded clay aggregates resulted in a decrease in strength, which after 56 days amounted to 17, 28 and 24% for the samples containing binder 1, 2 and 3, respectively. The results obtained for concretes in which half of the natural aggregate was replaced with recycled concrete were comparable to the reference samples, containing only gravel aggregate. It proves that the use of recycled aggregate with a gradation of 0÷16 mm in the production of ASCC does not adversely affect the mechanical properties of the final product. Among the three prepared binders, the lowest compressive strength was obtained for the mixtures containing 25% of fly ash. The addition of the ground waste glass cullet, both in combination with fly ash and as a separate additive, resulted in an increase in the strength of composites. The effect was insignificant after 28 days of curing, however, after 56 days, the difference in strength between concretes containing binder 1 and 2/3 reached as much as 20%.

Table 5 presents the compressive strength of samples subjected to the steaming process. With this method, after only 2 days of curing, it was possible to obtain concretes having the mechanical strength similar to the samples hydrating at room temperature for 28 days. There was no difference between the strength of the samples steamed at 45°C and those treated at 60°C. After 28 days, there was also no decrease in strength resulting from the possible occurrence of the alkali-silica reaction - ASR in concretes containing glass cullet.

Tablica 4 / Table 4

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE BETONÓW PO RÓŻNYM CZASIE DOJRZEWANIA

COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETES AFTER DIFFERENT CURING TIMES

Czas dojrzewania, dni Curing time, days	Wytrzymałość na ściskanie / Compressive strength, MPa								
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
2	19.2 ± 3.5	21.1 ± 2.3	21.5 ± 2.2	17.2 ± 3.5	21.4 ± 2.1	22.5 ± 2.2	14.0 ± 3.5	21.4 ± 2.1	19.5 ± 2.2
28	45.6 ± 3.2	46.8 ± 2.7	47.1 ± 3.5	47.3 ± 2.2	48.8 ± 3.7	47.4 ± 3.5	37.8 ± 2.2	40.1 ± 3.7	41.2 ± 3.5
56	55.9 ± 2.4	67.8 ± 3.2	64.5 ± 1.9	52.7 ± 2.4	63.3 ± 2.2	64.8 ± 2.5	46.4 ± 2.4	48.7 ± 2.2	49.2 ± 2.5

dukcji betonu ASCC kruszywa z recyklingu o uziarnieniu ciągłym 0÷16 mm nie wpływa negatywnie na właściwości gotowego wyrobu. Spośród trzech badanych spoiw najmniejszą wytrzymałość na ściskanie uzyskano dla mieszanek zawierających dodatek 25% popiołu lotnego. Dodatek mielonej słuczki szklanej, zarówno w połączeniu z popiołem, jak i w roli samodzielnego dodatku spowodowało wzrost wytrzymałości kompozytów. Po 28 dniach dojrzewania efekt ten był nieznaczny, jednak po 56 dniach różnica wytrzymałości betonów ze spoiwem 1, a 2 i 3 wynosiła nawet 20%.

W tablicy 5 przedstawiono zmierzoną wytrzymałość na ściskanie próbek poddanych dodatkowemu procesowi obróbki gorącą parą wodną. Dzięki jego zastosowaniu udało się, po zaledwie 2 dniach dojrzewania, uzyskać betony o wytrzymałości dorównującej betonom dojrzewającym przez 28 dni w temperaturze pokojowej. Nie stwierdzono różnicy pomiędzy wytrzymałością próbek naparzanym w 45°C, a tych poddanych obróbce w 60°C. Nie stwierdzono również zmniejszenia wytrzymałości po 28 dniach, wynikającego z ewentualnego wystąpienia reakcji krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu, w betonach zawierających dodatek słuczki szklanej.

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych, do prób w skali technologicznej wytypowano składy A3, B2, B3 i C3. Jako materiał odniesienia wybrano typowy beton przeznaczony do produkcji elementów prefabrykowanych o klasie wytrzymałości C25/30, klasie ekspozycji XC2 i konsystencji S4.

3. Badania prototypowych prefabrykatów betonowych

3.1. Produkcja elementów

Próbę technologiczną przeprowadzono z wykorzystaniem instalacji przemysłowej w zakładzie firmy MD Budinvest Sp. z o.o. W ramach tej próby wyprodukowano pełnowymiarowe elementy prefabrykowane dla budownictwa mieszkaniowego. Próbę podzielono na dwa etapy. W pierwszym z nich, w warunkach przemysłowych, przygotowano próbne zaroby mieszanek betonowych, dla sprawdzenia ich właściwości i ostatecznej weryfikacji składów. W drugim

Tablica 6 / Table 6

WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK BETONOWYCH WYKONANYCH W WARUNKACH PRZEMYSŁOWYCH

PROPERTIES OF FRESH CONCRETE MIXES OBTAINED UNDER INDUSTRIAL CONDITIONS

Mierzona właściwość / Properties	A3	B2	B3	C3	REF
Opad stożka po 5 minutach / Slump after 5 minutes, mm	>270	>270	>270	>270	160
Opad stożka po 30 minutach / Slump after 30 minutes, mm	>270	>270	>270	>270	140
Rozpływ stożka po 5 minutach / Slump flow after 5 minutes, cm	54	54	52	48	0
Rozpływ stożka po 30 minutach / Slump flow after 30 minutes, cm	47	47	42	42	0
Gęstość / Density, kg/m ³	2269	2215	2180	1975	2372
Zawartość powietrza / Air content, %	3.2	4.1	4.0	2.6	3.7

Tablica 5 / Table 5

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE BETONÓW PODDANYCH NAPARZANIU

COMPRESSIVE STRENGTH OF STEAM CURED CONCRETES

Czas dojrzewania, dni Curing time, days	Wytrzymałość na ściskanie / Compressive strength, MPa			
	B2 45°C	B2 60°C	B3 45°C	B3 60°C
2	45.9 ± 3.5	45.8 ± 2.1	47.7 ± 2.2	48.2 ± 2.2
28	45.4 ± 2.2	46.8 ± 3.7	44.4 ± 3.5	47.2 ± 3.5

Based on the preliminary laboratory studies, compositions A3, B2, B3 and C3 were selected for the industrial trial. A typical concrete used in the production of precast elements, having the C25/30 strength class, XC2 exposure class and S4 consistency was chosen, as the reference material.

3. Study of prototype precast concretes

3.1. Production of elements

The industrial trial was carried out using the production line at MD Budinvest Sp. z o.o plant. As part of the prototype tests, full-size precast elements for residential construction, were produced. The test was divided into two stages. In the first stage, the designed concretes were prepared under industrial conditions, in order to check their parameters and carry out a final verification of the compositions. In the second stage, prototype precast walls were produced in accordance with the documentation provided by the company. A3, B2, B3 and C3 concrete mix designs, adjusted to the industrial scale, were used in the trial.

For fresh mixes, similarly to the preliminary laboratory studies, consistency tests were carried out using the slump test and slump-flow test methods. The density of concrete mixtures and their air content were also determined, according to the adequate standards (61-64). The results obtained in industrial conditions are presented in Table 6.

Similarly to the laboratory trials, cubic samples with the dimensions of 150 mm x 150 mm x 150 mm were formed for the compressive strength measurements after 2, 28 and 56 days, as well as for the determination of surface water absorption and thermal conductivity

totyp o składzie takim samym jak materiał odniesienia. Jako element próbny wybrano ścianę jednowarstwową o wymiarach 334 cm x 295 cm, z otworem okiennym. Schemat prefabrykatu przedstawiono na rysunku 3.

Przygotowane szalunki zaopatrzone w zbrojenie z prętów stalowych, a następnie zalano mieszankami betonowymi B3, C3 i odniesienia. Podczas wykonywania mieszanek kontrolowano ich właściwości i korygowano ilość wody zarobowej, aby uzyskać odpowiednią konsystencję. Po wypełnieniu form mieszankami elementy poddano zagęszczaniu. W przypadku ściany z betonu wzorcowego konieczne okazało się intensywne wibrowanie przez kilkadziesiąt sekund, a następnie uzupełnienie powstałych luk i ponowne wibrowanie. Mieszanki B3 i C3 rozplływały się grawitacyjnie w znacznie większym stopniu. Aby wyrównać ich powierzchnię wystarczyło zastosować punktowe wibrowanie, przez kilkanaście sekund. Układ prętów zbrojeniowych w szalunku oraz jego wypełnienie mieszanką pokazano na rysunku 4. Gotowe elementy przykryto i pozostawiono na kilka godzin do wstępnego związania, umożliwiającego mechaniczne wyrównanie ich powierzchni. Po tym zabiegu prefabrykaty zabezpieczono przez utratą wilgoci i poddano początkowej hydratacji, w warunkach technologicznych. Po uzyskaniu odpowiedniej wytrzymałości ściany rozformowano, sprawdzono wymiary, oznaczono miejsca pobrania prób, a następnie poddano dalszemu dojrzewaniu przed kolejnych badaniami.

Sprawdzono poprawność wykonania gotowych prefabrykatów, niezbędną dla elementów prototypowych. W pierwszej kolejności dokonano oceny ich wymiarów gabarytowych – były one zgodne z wymaganiami. Następnie ze ścian pobrano odwierty rdzeniowe do normowych badań wytrzymałości na ściskanie i oceny klasy betonu w konstrukcji (64). Dodatkowo zbadano odporność betonów na działanie czynników atmosferycznych, określając zgodnie z normą PN-B-06250:1988 ich nasiąkliwość, gęstość objętościową oraz mrozoodporność po 50 cyklach zamrażania-rozmrażania.

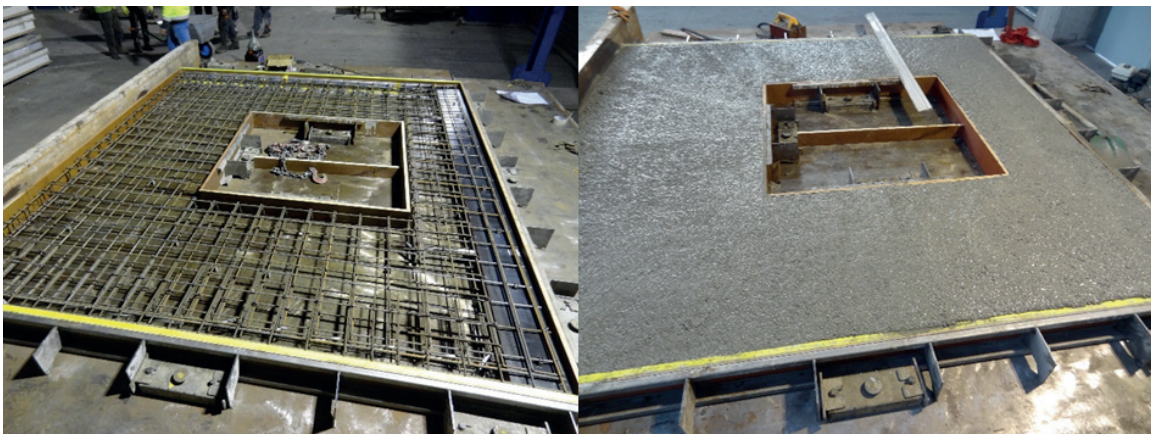
3.2. Wyniki badań gotowych elementów

Wyniki badań wytrzymałości prefabrykatów na ściskanie przedstawiono w tablicy 8. Ich analizę przeprowadzono zgodnie z metodą oceny betonu w konstrukcji określoną w normie

expanded clay aggregates resulted in an approx. 18% decrease in the thermal conductivity value and only a 7% decrease in compressive strength, after 28 days of curing. The use of recycled concrete aggregate allowed to reduce the thermal conductivity by 10%. At the same time, a 6% increase in the compressive strength was found after 28 days. Based on the verified results and in order to maximize the use of waste materials, B3 and C3 recipes were selected for the production of prototype precast elements. A prototype was also made using the reference concrete. A single-layer wall with the dimensions of 334 cm x 295 cm and a window opening was selected as the trial element. The outline of the element is presented in Fig. 3.

Steel rebars were placed in the formworks, which were subsequently filled with B3, C3 and REF concretes. During the preparation of the mixes, their parameters were controlled and the amount of mixing water was adjusted to obtain the appropriate consistency. After the moulds were filled with mixes, the elements were compacted. In case of the reference wall, intense vibrating for several dozen seconds was necessary to compact the mix, then the gaps were filled and the concrete was vibrated again. The B3 and C3 mixes flew by gravity to a much greater extent. In order to even out their surface, it was enough to apply a point vibration for several seconds. The arrangement of reinforcing bars inside the formwork and its filling with fresh mix is presented in Fig. 4. Finished elements were covered and left for a few hours for initial setting, which allowed their surface to be mechanically floated. Afterwards, the precast elements were covered again to prevent the loss of moisture. Upon obtaining appropriate strength, the walls were demolded, dimensioned, the sampling sites were marked and then the elements were left for curing, prior to testing.

The finished precast prototypes were subjected to conformance testing. First, their overall dimensions were assessed - they were compliant with the requirements. Then, core samples were drilled from the walls for standard compressive strength tests and the assessment of concrete class (62). Additionally, the resistance of concretes to weathering conditions were evaluated through the determination of their water absorption, bulk density and freeze-thaw resistance after 50 cycles. Tests were performed in accordance



Rys. 4. Szalunek po ułożeniu prętów zbrojeniowych [po lewej] oraz po wypełnieniu mieszanką betonową [po prawej]

Fig. 4. The formwork after arranging the reinforcing bars [left] and filling with fresh mixture [right]

PN-EN 13791:2008. Uzyskane w skali przemysłowej klasy wytrzymałości były we wszystkich przypadkach większe niż podczas badań wstępnych. Średnia wytrzymałość betonu zawierającego dodatek mielonej stłuczki szklanej i keramzytu okazała się taka sama, jak betonu wzorcowego, przygotowanego o typowej dla elementów prefabrykowanych składzie. Najlepsze wyniki uzyskano dla próbek z kruszywa betonowego, z recyklingu. Mając na uwadze wyniki badań laboratoryjnych, w których gruz betonowy wykazywał wytrzymałości zbliżone do kruszywa naturalnego. Natomiast próbka odniesienia,

tak jak serie B3 i C3, zawierała dodatek popiołu lotnego, można wnioskować, iż zwiększenie o 5% średniej wytrzymałości próbek w serii B3 odpowiada wprowadzona w ilości 12,5% masowych w stosunku do spoiwa mielonej stłuczki szklanej. Tym samym potwierdzone zostały dobre właściwości pucolanowe tego materiału.

Wyniki badań odporności próbek na działanie czynników atmosferycznych przedstawiono w tablicy 9. Betony zawierające w kruszywie keramzyt i gruz betonowy cechowała zbliżona nasiąkliwość, pomimo wyższej porowatości tego pierwszego. Uzyskane wartości nie przekraczały 5%., co oznacza, że elementy spełniały wymagania normy. Wyższa porowatość keramzytu odpowiadała również prawdopodobnie za nieco większe zmniejszenie wytrzymałości po 50 cyklach zamrażania-rozmrażania betonów oznaczonych C3. W żadnej z serii nie stwierdzono jednak uszkodzeń na powierzchniach próbek, a spadek masy i wytrzymałości nie przekraczał granicznych wartości wskazanych przez normę, a wynoszących odpowiednio 5% i 20%. Pozwala to stwierdzić, że wyprodukowane prefabrykaty spełniają wymagania dla klasy mrozoodporności F25.

Tablica 9 / Table 9

WYNIKI BADAŃ ODPORNOŚCI PRÓBEK NA DZIAŁANIE CZYNNIKÓW ATMOSFERYCZNYCH

THE RESULTS OF THE EVALUATION OF CONCRETES RESISTANCE TO WEATHERING CONDITIONS

Mierzona właściwość / Properties	Oznaczenie próbki / Sample designation	
	B3	C3
Średnia wytrzymałość na ściskanie po 50 cyklach zamrażania-rozmrażania Mean compressive strength after 50 freezing-thawing cycles, MPa	45.9 ± 1.0	39.7 ± 0.9
Średni spadek wytrzymałości względem próbek odniesienia Mean strength loss compared to reference samples, %	5.9	7.5
Średnia zmiana masy po badaniu / Mean change in sample mass after the test, %	-0.09	-0.61
Średnia nasiąkliwość / Mean water absorption, %m	4.5 ± 0.4	4.9 ± 0.3
Obecność uszkodzeń powierzchniowych / Visible surface damage	Brak / None	Brak / None

Tablica 8 / Table 8

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE GOTOWYCH WYROBÓW PROTOTYPOWYCH

COMPRESSIVE STRENGTH OF FINISHED PROTOTYPE ELEMENTS

Numer próbki / Sample no.	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa		
	B3	C3	REF
1	46.6 ± 0.3	42.5 ± 0.1	41.5 ± 0.2
2	49.2 ± 0.4	40.9 ± 0.3	40.8 ± 0.2
3	48.5 ± 0.2	40.1 ± 0.1	41.0 ± 0.2
4	47.5 ± 0.2	42.3 ± 0.2	41.7 ± 0.3
5	49.2 ± 0.9	41.5 ± 0.2	42.3 ± 0.2
6	46.1 ± 0.2	41.4 ± 0.2	42.6 ± 0.1
Wartość średnia / Mean value	47.8 ± 0.9	41.5 ± 0.6	41.6 ± 0.5
Wartość minimalna / Lowest value	46.1	40.1	40.8
Klasa wytrzymałości uzyskana w badaniach przemysłowych Strength class calculated from the industrial-scale results	C35/45	LC30/33	C30/37
Klasa wytrzymałości uzyskana w badaniach wstępnych Strength class calculated from the laboratory-scale results	C30/37	LC25/28	C25/30

with the PN-B-06250:1988 standard.

3.2. Results of tests performed on finished precast elements

The results of compressive strength measurements are presented in Table 8. Their analysis was carried out according to the procedure specified in the PN-EN 13791:2008 standard, which is used to assess in-situ compressive strength of concrete in structures and pre-cast concrete components. The strength classes obtained in the industrial trial were in all cases higher than during the preliminary laboratory tests. The mean compressive strength of concrete, containing ground waste glass cullet and expanded clay matched the reference composition, based on a typical precast mix design. The best results were obtained for the samples containing recycled concrete aggregate. Taking into account the results of the preliminary laboratory studies, in which recycled concrete provided similar strength values to the natural aggregate. Because the reference sample contained the addition of fly ash, same as B3 and C3 series, it can be concluded that the 15% increase in the mean compressive strength of B3 samples is related to the

4. Podsumowanie i wnioski

- Mielona stłuczka szklana może być stosowana jako dodatek do spoiwa w procesie produkcji wielkogabarytowych prefabrykatów betonowych. Uzyskane zarówno w skali laboratoryjnej, jak i w warunkach przemysłowych wyniki potwierdziły jej bardzo dobre właściwości pucolanowe. Wytrzymałość na ściskanie betonów, w których 25% cementu zostało zastąpione stłuczką, była nawet o 20% większa od wytrzymałości elementów, w których zastosowano analogiczne zastąpienie cementu popiołem lotnym krzemionkowym. W trakcie trwającego 56 dni badania laboratoryjnego nie stwierdzono również spadku wytrzymałości, które mogłyby świadczyć o wystąpieniu szkodliwego wpływu reakcji krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu.
- Zastąpienie połowy naturalnego kruszywa żwirowego gruzem betonowym z recyklingu o uziarnieniu ciągłym 0÷16 mm, nie wpływa niekorzystnie na wytrzymałość na ściskanie ścian prefabrykowanych. Duża wodożądność kruszywa z recyklingu spowodowała, zgodnie z doniesieniami literaturowymi, pogorszeniem konsystencji po 30 minutach od zmieszania betonu z wodą zarobową. Zastosowanie mieszanek ASCC pozwoliło jednak na zaformowanie prefabrykatów w bardzo krótkim czasie. Ich duży rozptył sprawił, że zagęszczanie zbrojonych elementów wymagało znacznie mniej czasu i energii, niż w przypadku tradycyjnie stosowanej mieszanki betonowej, o konsystencji S4. Ponadto zmierzony współczynnik przewodzenia ciepła był o około 10% mniejszy niż dla betonu zawierającego wyłącznie żwir.
- Zastąpienie żwiru o uziarnieniu 2÷8 mm analogiczną frakcją keramzytu spowodowało zmniejszenie współczynnika przewodzenia ciepła o około 18%. Zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania betonu zawierającego wyłącznie kruszywo naturalne wynosiło przy tym zaledwie około 7%. Co więcej, nie stwierdzono niekorzystnego wpływu keramzytu na nasiąkliwość i mrozoodporność. Zastosowanie w badaniach przemysłowych dodatku pucolanowego jako mielonej stłuczki szklanej sprawiło, że końcowa wytrzymałość na ściskanie betonu zawierającego keramzyt była taka sama, jak betonu wzorcowego, zawierającego sam żwir. Oznacza to, że dodatek stłuczki umożliwił poprawienie parametrów termoizolacyjnych prefabrykatów dzięki wprowadzeniu kruszywa lekkiego, bez niekorzystnego wpływu na wytrzymałość gotowego wyrobu.
- Zastosowanie dodatkowej obróbki gorącą parą wodną pozwoliło, po zaledwie 2 dniach dojrzewania, uzyskać betony o wytrzymałości dorównującej próbkom twardniejącym przez 28 dni w temperaturze pokojowej. Nie stwierdzono różnicy między wytrzymałością próbek naparzanym w 45°C, a tych poddanych obróbce w 60°C. Nie stwierdzono również spadku wytrzymałości po 28 dniach, wynikającego z wystąpienia reakcji krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu, w betonach zawierających dodatek stłuczki szklanej.

addition of 12.5% of ground waste glass cullet by the mass of the binder. Therefore, the good pozzolanic properties of the material were confirmed.

The results of the evaluation of samples resistance to weathering conditions are presented in Table 9. The concretes containing expanded clay and recycled concrete aggregate were having the similar water absorption, despite the higher porosity of the former. The obtained values did not exceed 5%, which means that the elements met the requirements of the standard. The higher porosity of the expanded clay aggregate was also most likely responsible for a slightly higher decrease in strength after 50 freezing-thawing cycles, found for the C3 concrete. However, no damage was visible on the surface of the samples in any of the series and the decrease in mass and strength did not exceed the limit values indicated by the standard [amounting to 5% and 20%, respectively], which allows to conclude that the obtained precast elements meet the requirements for the F25 freeze-thaw resistance class.

4. Summary and conclusions

- Ground waste glass cullet can be effectively used as an additive in the production of large precast concrete elements. The results obtained both in laboratory scale and under industrial conditions confirmed its excellent pozzolanic properties. The compressive strength of concretes, in which 25% of cement was replaced with glass cullet, was even 20% higher compared to elements with the same addition of siliceous fly ash. During the 56-day laboratory study, no drops in strength related to the harmful effects of the alkali-silica reaction were observed.
- Replacing half of the natural gravel aggregate with graded recycled concrete aggregates had no negative impact on the compressive strength of precast concrete walls. As reported in literature, high water demand of the recycled aggregate, resulted in a rapid decrease in the consistency of the fresh mix, noticeable after 30 minutes. However, the use of ASCC mixtures allowed for the formation of precast elements in a very short time. Due to their high flow, the compaction of reinforced elements required much less time and energy than in the case of the traditionally used S4 consistency concrete. Moreover, the thermal conductivity measured was approx. 10% lower than for the traditional concrete, containing only gravel aggregate.
- Replacing the 2÷8 mm gravel with the same fraction of expanded clay resulted in an approx. 18% decrease in thermal conductivity. After 28 days of curing, the compressive strength was only approx. 7% lower, in comparison to concrete containing pure natural aggregate blend. Moreover, no negative impact of the expanded clay aggregate addition on both water absorption and freeze-thaw resistance of hardened concretes was found. The introduction of the ground waste glass cullet allowed to obtain an expanded clay aggregate-containing concrete had the mean compressive strength similar to the reference element, based solely on the gravel aggregate. This means that with the addition of cullet, it is possible to improve the thermal

- Mielona stłuczka szklana może z powodzeniem zastępować popiół lotny krzemionkowy w produkcji betonowych elementów prefabrykowanych.

Literatura / References

1. Statistical bulletin 12/2020, Statistics Poland, Warsaw (2021).
2. P. Piestrzyński, Przemysł cementowy – rozwijamy polską gospodarkę. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, **3**, 66-8 (2018).
3. A clean planet for all. A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, COM(2018)773, European Commission, 2018.
4. <https://ember-climate.org/data/carbon-price-viewer/> (accessed: 20.03.2021).
5. Statistical Yearbook of Industry – Poland 2020, Statistics Poland, 2020.
6. Przemysł Cementowy w Liczbach – Informator SPC – 2020, Polish Cement Association, 2020.
7. W. Kurdowski, Chemistry of Cement and Concrete, Springer, 2014.
8. <https://www.pb.pl/jedni-sa-eko-innym-brakuje-popiolu-1002885> (accessed: 20.03.2021).
9. <https://poland.arcelormittal.com/media/artykul/news/arcelormittal-poland-na-stale-zamknie-czesc-surowcowa-krakowskiej-huty/> (accessed: 20.03.2021).
10. E. Kapeluszna, Ł. Kotwica, G. Malata, P. Murzyn, W. Nocuń-Wczelik, The effect of highly reactive pozzolanic material on the early hydration of alite – C₃A – gypsum synthetic cement systems. Constr. Build. Mater. **251**, 118879 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118879>
11. E. Kapeluszna, Ł. Kotwica, W. Pichór, W. Nocuń-Wczelik, Cement-based composites with waste expanded perlite - Structure, mechanical properties and durability in chloride and sulphate environments. Sust. Mater. Techn. **24**, e00160 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00160>
12. L. L. Zagorodnyuk, D. Sumskey, V. Lesovik, R. Fediuk, Modified heat-insulating binder using jet-grinded waste of expanded perlite sand. Constr. Build. Mater. **260**, 120440 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120440>
13. W. Pichór, M. Barna, E. Kapeluszna, A. Łagosz, Ł. Kotwica, The influence of waste expanded perlite on chemical durability of mortars. Sol. State Phenom. **227**, 194-198 (2015). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.227.194>
14. Ł. Kotwica, W. Pichór, E. Kapeluszna, A. Różycka, Utilization of waste expanded perlite as new effective supplementary cementitious material. J. Clean. Prod. **140**, 1344-1352 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.018>
15. E. Kapeluszna, Ł. Kotwica, W. Pichór, W. Nocuń-Wczelik, Study of expanded perlite by-product as the mineral addition to Portland cement. Cem. Wapno Beton **20**(1), 38-44 (2015).
16. W.-J. Long, X.-W. Tan, B.-X. Xiao, N.-X. Han, F. Xing, Effective use of ground waste expanded perlite as green supplementary cementitious material in eco-friendly alkali activated slag composites. J. Cleaner Prod. **213**, 406-414 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.118>
17. A. Łagosz, D. Olszowski, W. Pichór, Ł. Kotwica, Quantitative determination of processed waste expanded perlite performance as a supplementary cementitious material in low emission blended cement composites. J. Build. Eng., **40**, 102335 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102335>

insulation parameters of precast elements by the addition of a lightweight aggregate, without adversely affecting the strength of the final product.

- Introduction of the additional steam curing process allowed to obtain, after only 2 days of curing, concretes with the mechanical strength similar to the samples hydrating at room temperature for 28 days. There was no difference between the strength of the samples steamed at 45°C and those treated at 60°C. After 28 days, there was also no decrease in strength, resulting from the possible occurrence of the alkali-silica reaction [ASR], in concretes containing ground waste glass cullet.
- Ground waste glass cullet can be successfully used as a fly ash replacement in the production of precast concrete elements.

18. H.Y. Ghorab, M. Rizk, A.S. Meawad, M. El Sayed, Reporting the performance of the rice straw ash as cement replacement material. *Cem. Wapno Beton* **23**(2), 107-114 (2018).
19. S. Munshi, R.P. Sharma, Experimental Investigation on Strength and Water Permeability of Mortar Incorporate with Rice Straw Ash. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2016**, 9696505 (2016). <https://doi.org/10.1155/2016/9696505>
20. D. Chopra, R. Siddique, Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash. *Biosyst. Eng.* **130**, 72-80, (2015). <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.12.005>
21. R. Ferraro, A. Nanni, Effect of off-white rice husk ash on strength, porosity, conductivity and corrosion resistance of white concrete. *Constr. Build. Mater.* **31**, 220-225 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.010>
22. P. Stępień, J. Małolepszy, The impact of calcareous gaize on alite hydration process. *Cem. Wapno Beton* **22**(1), 68-76 (2017).
23. J. Małolepszy, P. Stępień, The influence of gaize addition on sulphate corrosion of CEM II/A and CEM II/B cements. *Procedia Eng.* **108**, 270-276 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.147>
24. A. Bazrafkan, A. Habibi, A. Sayari, Experimental study on mechanical properties of concrete with marble dust. *Cem. Wapno Beton* **25**(4), 316-29 (2020). <https://doi.org/10.32047/CWB.2020.25.4.6>
25. Ł. Golek, E. Kapeluszná, K. Rzepa, Investigations of the glass activity in municipal and special incinerating plants waste. *Cem. Wapno Beton* **22**(1), 77-80 (2017).
26. J.R. Pan, C. Huang, J.-J. Kuo, S.-H. Lin, Recycling MSWI bottom and fly ash as raw materials for Portland cement. *Waste Manage.* **28**(7), 1113-1118 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.04.009>
27. G. Girskaš, O. Kiziničevič, V. Kiziničevič, Analysis of durability (frost resistance) of MSWI fly ash modified cement composites. *Arch. Civ. Mech. Eng.* **21**(2), 39 (2021). <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00199-2>
28. L. Bertolini, M. Carsana, D. Cassago, A.Q. Curzio, M. Collepardi, MSWI ashes as mineral additions in concrete. *Cem. Concr. Res.* **34**(10), 1899-906 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.001>
29. Ł. Golek, J. Deja, M. Sitarz, Z. Fojud, The role of aluminium ions during the slag activation process. *Physics and Chemistry of Glasses: European Journal of Glass Science and Technology Part B* **55**(2), 111-7 (2014).
30. Ł. Kotwica, M. Chorembala, E. Kapeluszná, M. Illikainen, Ł. Golek, Influence of calcined mine tailings on the properties of alkali activated slag mortars. *Key Eng. Mat.*, **761**, 83-86 (2018). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.761.83>
31. G. Mascolo, Hydration products of synthetic glasses similar to blast-furnace slags. *Cem. Concr. Res.* **3**, 207-13 (1973). [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(73\)90048-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(73)90048-3)
32. Ł. Kotwica, M. Chorembala, E. Kapeluszná, M. Illikainen, Ł. Golek, Effect of metakaolinite on properties of alkali activated slag materials. *Key Eng. Mat.* **761**, 69-72 (2018). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.761.69>
33. J. Kiventera, I. Lancellotti, M. Catauro, F.D. Poggetto, C. Leonelli, M. Illikainen, Alkali activation as new option for gold mine tailings inertization. *J. Cleaner Prod.* **187**, 76-84 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.182>
34. A. Fernandez-Jimenez, A. Palomo, Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cem. Concr. Res.* **35**(10), 1984-92 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.003>
35. L. Reig, M.M. Tashima, M.V. Borrachero., J. Monzo, C.R. Cheeseman, J. Paya, Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. *Constr. Build. Mater.* **43**, 98-106 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.031>
36. S. Kucharczyk, M. Sitarz, M. Zając, J. Deja, The effect of CaO/SiO₂ molar ratio of CaO-Al₂O₃-SiO₂ glasses on their structure and reactivity in alkali activated system. *Spectrochim. Acta A* **194**, 163-71 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.01.018>
37. S. Kucharczyk, M. Zając, C. Stabler, R.M. Thomsen, M. Ben Haha, J. Skibsted, J. Deja, Structure and reactivity of synthetic CaO-Al₂O₃-SiO₂ glasses. *Cem. Concr. Res.* **120**, 77-91 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.004>
38. R. Idir, M. Cyr, A. Tagnit-Hamou, Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. *Constr. Build. Mater.* **24**, 1309-12 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.030>
39. C. Shi, Y. Wu, C. Riefler, H. Wang, Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cem. Concr. Res.* **35**, 987-93 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.015>
40. P. Walczak, J. Małolepszy, M. Reben, K. Rzepa, Mechanical properties of concrete mortar based on mixture of CRT glass cullet and fluidized fly ash. *Procedia Eng.* **108**, 453-458 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.170>
41. J. Deja, Ł. Golek, Ł. Kołodziej, Application of glass cullet in binder production. *Cem. Wapno Beton* **16**(6), 349-354 (2011).
42. A. Mehta, D.K. Ashish, Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review. *J. Build. Eng.* **29**, 100888 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100888>
43. Ł. Golek, W. Szudek, M. Błądek, M. Cięciwa, The influence of ground waste glass cullet addition on the compressive strength and microstructure of Portland cement pastes and mortars. *Cem. Wapno Beton* **25**(6), 480-94 (2020). <https://doi.org/10.32047/CWB.2020.25.6.5>
44. A. Shayan, A. Xu, Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cem. Concr. Res.* **34**, 81-89 (2004). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00251-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00251-5)
45. A. Shayan, A. Xu, Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. *Cem. Concr. Res.* **36**, 457-468 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.012>
46. R.G. Pike, D. Hubbard, E.S. Newman, Silicate glasses in the study of alkali aggregate reaction. *High Res. Board Bull.* **275**, 39-44 (1960).
47. C.D. Johnston, Waste glass as coarse aggregate for concrete. *J. Test. Eval.* **2**(5), 344-350 (1974). <https://doi.org/10.1520/JTE10117J>
48. Ł. Golek, Glass powder and high-calcium fly ash based binders - long term examinations. *J. Clean. Prod.* **220**, 493-506 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.095>
49. Y. Shao, T. Lefort, S. Moras, D. Rodriguez, Studies on concrete containing ground waste glass. *Cem. Concr. Res.* **30**, 91-100 (2000). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00213-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00213-6)
50. G.M. Sadiqul Islam, M.H. Rahman, N. Kazi, Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *Int. J. Sust. Built. Environ.* **6**(1), 37-44 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.ijbe.2016.10.005>
51. N. Schwarz, H. Cam, N. Neithalath, Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cem. Concr. Compos.* **30**, 486-496 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.02.001>
52. J. Kim, J.-H. Moon, J.W. Shim, J. Sim, H.-G. Lee, G. Zi, Durability properties of a concrete with waste glass sludge exposed to freeze-and-thaw condition and de-icing salt. *Constr. Build. Mater.* **66**, 398-402 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.081>

53. K. Rajczyk, G. Janus, A. Kaliciak, D. Brukhanska, Study of the possibility of using modified fine fraction obtained from recycled concrete rubble as cement additive. *Cem. Wapno Beton*, **24**(3), 188-201 (2019). <https://doi.org/10.32047/CWB.2019.24.3.188>
54. S. Lotfi, M. Eggimann, E. Wagner, R. Mróz, J. Deja, Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology. *Constr. Build. Mater.* **95**, 243-56 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.021>
55. A.T. Gebremariam, A. Vahidi, F. Di Maio, J. Moreno-Juez, I. Vegas-Ramiro, A. Łagosz, R. Mróz, P. Rem, Comprehensive study on the most sustainable concrete design made of recycled concrete, glass and mineral wool from C&D wastes. *Constr. Build. Mater.* **273**, 121697 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121697>
56. K. McNeil, T. H-K. Kang, Recycled concrete aggregates: A review. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* **7**, 61-9 (2013). <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0032-5>
57. R.V. Silva, J de Brito, R.K. Dhir, Properties and composition of recycled from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Constr. Build. Mater.* **65**, 201-217 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>
58. D. Pedro, J. de Brito, L. Evangelista, Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. *Constr. Build. Mater.* **71**, 141-51 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.030>
59. G. Łój, The possibility of using recycled aggregates from construction of produce vibro-pressed concrete, *Monografie technologii betonu: IX konferencja Dni Betonu: tradycja i nowoczesność*, **1**, 753-766 (2016).
60. R. Mróz, The issue of the construction and demolition concrete waste, *Budownictwo, Technologie, Architektura*, **4**, 64-68 (2014).
61. PN-EN 12350-7:2019-08: Badania mieszanki betonowej – Część 7: Badanie zawartości powietrza -- Metody ciśnieniowe
62. PN-EN 12350-8:2019-08: Badania mieszanki betonowej – Część 8: Beton samozagęszczalny – Badanie konsystencji metodą rozplywu stożka
63. PN-EN 12390-1:2013-03: Badania betonu – Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badań i form
64. PN-EN 12390-03:2019-07: Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań