

# Zastosowanie stłuczki szklanej w małogabarytowych elementach prefabrykowanych

## The use of glass cullet in small-sized prefabricated elements

prof. dr hab. inż. Renata Kotynia (ORCID: 0000-0002-7247-1229),  
mgr inż. Radosław Walendziak, Politechnika Łódzka, Katedra Budownictwa Betonowego

DOI: 10.5604/01.3001.0054.1323

**Streszczenie:** Badania mają na celu wskazanie obszaru zastosowań stłuczki szklanej w budownictwie jako dodatku do betonu w zastępstwie kruszywa naturalnego. Celem badań było opracowanie optymalnego składu mieszanki betonowej z wykorzystaniem materiałów z recyklingu szkła. Na podstawie pilotażowych badań przyjęto, że właściwości mechaniczne betonu będą odpowiadać parametrom typowego betonu cementowego, wykorzystywanego przy produkcji prefabrykowanych elementów drobnomiarowych w drogownictwie. Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że stłuczka szklana z recyklingu może być stosowana w betonie jako materiał zastępujący kruszywo naturalne. Jednakże pomimo spełnienia podstawowych wymagań trwałościowych nadal decydującym czynnikiem determinującym zastosowanie betonu w drogownictwie jest jego niska odporność na reakcję alkalia-krzemionka.

**Słowa kluczowe:** stłuczka szklana, beton z dodatkiem szkła, kostka betonowa, infrastruktura drogowa.

**Abstract:** The aim of the research is to identify the field of application of glass cullet in structural engineering, as an additive to concrete in place of natural aggregate. The purpose of the research was to develop an optimal composition of the concrete mix using recycled glass materials. Based on the pilot study, it was assumed that the mechanical properties of the concrete will correspond to the parameters of typical cement concrete, used in the production of prefabricated small-size elements in the road construction industry. Based on the results, it can be concluded that recycled glass cullet can be used in concrete as a replacement material for natural aggregate. However, despite meeting the basic durability requirements, the determining factor in the applicability of the use of concrete in road construction is still its weak resistance to alkali-silica reactions.

**Keywords:** glass cullet, concrete with glass, concrete block, road infrastructure.

## 1. Wprowadzenie

Szkoło jest materiałem powszechnie stosowanym na opakowanie, jako materiał obojętny, który w zasadzie nie traci swoich właściwości z wiekiem, a jego zaletą jest możliwość powtórnego wykorzystania. Stale rosnąca popularność wykorzystywania szkła w przemyśle czy też branży budowlanej, chemicznej lub spożywczej wiąże się z ciągłym wzrostem ilości odpadów szklanych. Sposób i zakres ponownego wykorzystania odpadu szklanego w dużej mierze zależy od jego zanieczyszczenia wynikającego z sposobu użytkowania oraz produkcji. Tym niemniej jest to produkt nadający się do ponownego wykorzystania. Proces przygotowania stłuczki szklanej o parametrach właściwych do ponownego przetopienia jest energochłonny i obejmuje: oczyszczenie odpadów szklanych, segregację ze względu na szkło kolorowe oraz bezbarwne, wstępne kruszenie szkła oraz kolejną segregację magnetyczną, mającą na celu usunięcie resztek papieru oraz metalu, drewna czy folii oraz zanieczyszczeń metalami ciężkimi. Podzielone i oczyszczone odpady szklane są rozdrabniane do żądanej wielkości i tak przygotowane mogą zostać przekazane do huty szkła. Do produkcji szkła

często wymaga się stłuczki o bardzo wysokiej czystości. Wymaga to skomplikowanego procesu technologicznego w celu wyselekcjonowanej stłuczki nadającej się do dalszego wykorzystania. Część stłuczki odrzucanej w takim procesie zawiera nadal znaczny udział pełnowartościowego szkła, choć o większym zagęszczeniu wtrąceń trudnych do wyselekcjonowania (bardzo ciemnego szkła, grubych denek butelek i ich szyjek, płytek szklanych i ceramiki). Taki produkt po przekruszeniu i frakcjonowaniu może znaleźć zastosowanie w budownictwie.

Prognozy rozwoju inwestycji budowlanych i drogowych w nadchodzących latach wskazują na poszukiwanie nowych źródeł materiałów, które mogłyby w części zastąpić źródła naturalne. W ramach przyjętej uchwały w sprawie Programu budowy 100 obwodnic na lata 2020–2030, w całej Polsce powstanie 100 zadań o łącznej długości ok. 820 km [1]. Ponieważ zasoby surowców naturalnych są ograniczone, w strategii wytyczającej kierunki działań poprawiających dostęp do surowców zwrócono uwagę na jak najszerze stosowanie surowców wtórnych [2].

Celem badań objętych niniejszym programem jest potencjalna możliwość zmniejszenia zużycia naturalnych zasobów

kruszywa poprzez wykorzystanie materiałów z recyklingu przy produkcji betonowych elementów niekonstrukcyjnych, takich jak drobnowymiarowe elementy prefabrykowane w budownictwie drogowym i komunikacyjnym.

## 2. Surowce do produkcji prefabrykatów betonowych

### 2.1. Kruszywo naturalne

Wybór kruszywa do badań doświadczalnych był uwarunkowany uzyskaniem właściwych parametrów mechanicznych betonu, a przy opracowaniu odpowiedniej receptury również uwzględniono aspekt ekonomiczny. W badaniach doświadczalnych użyto kruszyw naturalnych typowych dla betonu cementowego (piasek, żwir), a w celu uzyskania właściwej krzywej uziarnienia stosu okruszowego stosowano również popiół lotny krzemionkowy. Skład mieszanki betonowej obejmował: kruszywo naturalne, kruszywo drobne w postaci piasku płukanego oraz kruszywo grube żwir frakcji do 16 mm.

### 2.2. Kruszywo z recyklingu szkła

Badania oparto na stłuczce szklanej z recyklingu pobranej bezpośrednio z placu składowego po jej przekruszeniu w celu uzyskania frakcji nie większej niż 16–20 mm. Recykling stanowiło szkło z opakowań, lusterek oraz szkło okienne. Stłuczka szklana wykorzystana do badań, określona jako niesortowana, miała postać nieforemnych kształtów ograniczonych przez wstępne przesianie do maksymalnej wielkości 16 mm. Materiał jest bardzo zanieczyszczony dużą ilością frakcji pyłowej, a ponadto występują w nim płaskie „nadziarna” o wielkości nawet do 40 mm. W laboratorium KBB sortowano stłuczkę poprzez odsianie na sitach 2 i 5 mm frakcji 0/2; 2/5; 5/16 mm (rys. 1).

**Tabela 1.** Skład zarobów do badań mieszanki na cemencie CEM I 42,5 R

Skład/zarób nr	Z1-0	Z2-29	Z3-46	Z4-69	Z5-50	Z7-63
Cement CEM I 42,5 R	320	320	320	320	320	320
Piasek 0/2	670	670	670	201	340	700
Żwir 2/8	490	490	140	140	230	0
Żwir 8/16	800	240	190	240	380	0
Woda	148	148	148	148	145	142
Szkło frakcji 0/5	-	-	290	759	580	-
Szkło frakcji 5/16	-	560	560	560	380	-
Szkło frakcji 0/16	-	-	-	-	-	1200
Suma kruszywo naturalne [kg]	1960	1400	1000	581	950	700
Suma szkło [kg]	0	560	850	1319	960	1200
Suma kruszywo i szkło [kg]	1960	1960	1850	1900	1910	1900
Procentowa zawartość szkła w mieszance [%]	0	29	46	69	50	63



**Rys. 1.** Szkło frakcjonowane; od lewej: frakcje: 0/2; 2/5; 5/16 mm

### 2.3. Cement

Do badań użyto dwóch rodzajów cementów – cementu portlandzkiego CEM I 42,5R oraz cementu portlandzkiego żuźlowego CEM II/A-S 42,5N. Cement CEM II/A-S charakteryzował się najniższą zawartością alkaliów, ekwiwalent  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 0,57\%$ , cement portlandzki CEM I 42,5R typową dla tego rodzaju, wysoką zawartością alkaliów, ekwiwalent  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 1,02\%$ .

## 3. Zakres i metodyka badań

Badania doświadczalne oparto na założeniach możliwości zastąpienia tradycyjnego betonu kruszywem z recyklingu szkła. Skład mieszanki określono w proporcji dozowania stłuczki szklanej w połączeniu z kruszywem naturalnym w celu uzyskania optymalnych parametrów wytrzymałościowych, niskiej absorpcji wody i dobrej urabialności. Przyjęto z założenia mieszankę:

- konsystencji gęstoplastycznej, zagęszczanej mechanicznie na stoliku wibracyjnym,
- średniej wytrzymałości na ścislenie próbek nie mniejszej niż 40 MPa,
- składzie kruszywa naturalnego o uziarnieniu do 16 mm,
- z wykorzystaniem szkła z recyklingu.

W betonie referencyjnym wyjściowo założono cement portlandzki w ilości 320 kg/m<sup>3</sup> i stosunku  $w/c = 0,45$ , który stanowił przykład betonu przeznaczonego do elementów prefabrykowanych. Zarówno beton referencyjny (Z1-0), jak i pozostałe nie był napowietrzany, stosowano jedynie domieszkę upłynniającą. Składy zarobów przedstawiono w tabeli 1.

**Tabela 2.** Wyniki wytrzymałości na ściskanie i nasiąkliwości próbek betonu po 7–190 dniach

Zarób nr	Ilość szkła w składzie [%] m.k.	Wytrzymałość na ściskanie $f_{ci}$ [MPa] wiek betonu [dni]						Nasiąkliwość $n$ [%]
		7	14	28	56	90	190	28
Z1-0	0	50,5	56,8	61,0	66,2	68,1	-	2,7
Z2-29	29	36,4	41,9	48,2	46,7	45,1	-	3,6
Z3-46	46	37,2	36,3	43,4	40,5	39,7	-	3,6
Z4-69	69	40,1	43,2	44,7	38,9	37,9	36,5	4,5
Z5-50	50	43,4	49,1	47,2	44,9	44,9	42,4	4,0
Z7-63	63	41,6	46,4	48,1	46,6	43,4	41,8	4,1

### 3.1. Badania z zastosowaniem cementu CEM I 42,5R

W pierwszym etapie badań oceniono podstawowe parametry betonu, wytrzymałość i nasiąkliwość mieszanek z cementem rodzaju CEM I 42,5 R. Wyniki wytrzymałości na ściskanie i nasiąkliwości próbek betonu po 7–190 dniach dojrzewania w wodzie, zawarto w tabeli 2. Badania przeprowadzono na próbkach sześciennych o boku 150 mm.

Nasiąkliwość betonu badano zgodnie z normą PN-EN 1338 po 28 dniach dojrzewania próbek w komorze klimatycznej w temperaturze +20°C i wilgotności  $\geq 95\%$ . Po tym czasie próbki zanurzono w wodzie, po nasączeniu rozpoczęto suszenie, a po dwóch dniach suszenia na powierzchni próbek stwierdzono nieregularne rysy i pęknięcia. Uszkodzenia przebiegały przez całą długość próbki, a szerokość rozwarcia rys wynosiła do 1 mm (rys. 2). Próbki zarobu Z1-0, który nie zawierał dodatku szkła w składzie, nie wykazały żadnych uszkodzeń podczas badania nasiąkliwości.

W normalnych warunkach dojrzewania zaczyn cementowy nie reaguje z kwarcem. Natomiast podczas obróbki termicznej (+60°C) reakcja ulega znacznemu przyspieszeniu. W przypadku badanych próbek, zgodnie z procedurą badawczą przy określaniu nasiąkliwości, próbki najpierw zostały nasączone wodą, a następnie poddane suszeniu w temperaturze +105°C, co spowodowało przyspieszenie reakcji alkalicznej (ASR – Alkali-Silica Reaction) w zaczynie i skutkowało licznymi uszkodzeniami w postaci nieregularnych rys na każdej ze ścian próbki. Mieszanina kruszyw w zarobach naturalnych i szkła z recyklingu, stanowiła składnik bogaty w reaktywną krzemionkę. To spowodowało bardzo szybką reakcję, która doprowadziła do ekspansji w porach zaczynu i spowodowała silne jego spękanie (rys. 2).

W ten sposób krzemionka wprowadzana do mieszanki w postaci szkła w obecności

**Rys. 2.** Pęknięcia ścian próbki zarobów; od lewej: Z4-69, Z5-50, Z7-63



cementu CEM I 42,5 R bardzo szybko doprowadziła do reakcji chemicznych, które spowodowały wewnętrzne zniszczenie struktury próbek. To najwyraźniej skutkowało spadkiem wytrzymałości betonu na ściskanie wraz z dojrzewaniem betonu (> 28 dnia) oraz widocznymi uszkodzeniami próbek na skutek nasączenia wodą i suszenia.

### 3.2. Badania z zastosowaniem cementu CEM II/A-S 42,5N

Dodatek szkła z recyklingu doprowadził do silnej reakcji krzemionki z alkaliami pochodzącyymi z cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R. Nawet zastosowanie dodatków potencjalnie ograniczających reakcje ASR nie gwarantuje wyeliminowania efektu szkodliwości reakcji ASR w przypadku betonów z wysoką zawartością szkła w składzie. Dlatego przy projektowaniu składu kolejnych mieszanek zastosowano dodatkowo następujące działania:

- cement portlandzki rodzaju CEM I 42,5 R zastąpiono cementem portlandzkim żuźlowym CEM II/A-S 42,5 N,
- zmniejszono ilość cementu z 320 do 260 kg,
- ograniczono ilość szkła do 30–50% masy kruszywa,
- zastosowano dodatek w postaci popiołu lotnego, który stanowił zamiennik masy cementu przy zachowaniu niezmienniej zawartości wody.

Popiół lotny stosuje się w ilości 15–25% masy cementu w zależności od właściwości. Betony o dużej zawartości popiołów lotnych 40–60%, nazywane *high volume fly ash concrete*, stosowane są w konstrukcjach masywnych. W opracowanym składzie mieszanek, popiół lotny dozowany był w ilości 30–50%, co miało korzystny wpływ na ograniczenie reakcji ASR. Dodatek popiołu lotnego poprawia urabialność mieszanki, zwiększa odporność na czynniki agresywne poprzez zmniejszenie ilości dużych porów, zwiększenie szczelności, a tym samym zmniejsza przepuszczalność betonu dla penetracji wody i gazu. Dodatek popiołów ogranicza niebezpieczeństwo reakcji alkaliów z kruszywem. Zastosowanie popiołu utrudnia jednakże stabilne napowietrzanie betonu za pomocą domieszek chemicznych [3]. Efekt ten potwierdzono w własnych badaniach trwałościowych. W przypadku betonów z dodatkiem popiołu lotnego i stłuczki szklanej trudno

**Tabela 3.** Skład zarobów do badań mieszanki na cemencie CEM II/A-S 42,5 N

Skład/zarób nr	Z11-0	Z10	Z13	Z7
Cement CEM II/A-S 42,5 N	260	260	260	320
Piasek 0/2	760	760	0	720
Żwir 2/8	520	360	520	159
Żwir 8/16	625	420	500	600
Woda	140	140	150	155
Szkoło frakcji 0/2	-	-	860	371
Szkoło frakcji 2/16	-	345	-	-
Popiół lotny (V)	104	104	117	64
Suma kruszywo naturalne [kg]	1905	1540	1020	1479
Suma szkło [kg]	-	345	860	371
Suma kruszyw, szkło + naturalne [kg]	1905	1885	1880	1850
Zawartość szkła w mieszance [%]	0	18	46	20

było uzyskać właściwe napowietrzenie. Nie dla każdej mieszanki uzyskano satysfakcjonujące parametry napowietrzenia i co za tym idzie trwałościowe.

Skład zarobów z cementem CEM II/A-S 42,5 N w składzie przedstawiono w tabeli 3, a wyniki badań wytrzymałościowych i trwałościowych w tabelach 4 i 5.

Próbki betonu wykonane z zastosowaniem cementu CEM II/A-S 42,5 N w ilości 300–360 kg/m<sup>3</sup> poddane cyklicznym zmianom temperatury podczas badania mrozoodporności nie spełniły wymagań. Bez względu na ilość wprowadzonego powietrza po badaniu odnotowano duże spadki wytrzymałości  $\Delta f_F$  próbek zamrażanych lub całkowite ich rozkruszenie. Trudno jednoznacznie określić przyczynę braku odporności betonu na działanie mrozu. Teoretycznie może być to zaniżona wyjściowa zawartość powietrza

**Tabela 4.** Wyniki badań wytrzymałościowych na kostkach 150x150 mm

Zarób nr	Ilość szkła w [%] m.k.	Wytrzymałość [MPa]							
		Ściskanie $f_{ci}$ wiek betonu [dni]						Zginanie, $f_{clflex}$	Rozciąganie, $f_{ctsplit}$
		7	14	28	56	90	190	28	28
Z10	18	22,5	28,5	36,5	47,6	45,6	45,5	4,9	4,25
Z11	0	33,5	41,5	50,6	60,7	66,6	69,4	6,2	4,10
Z13	46	29,2	36,6	44,2	58,3	58,6	58,5	6,4	4,50
Z7	20	36,1	39,2	50,0	54,9	60,9	49,0	6,5	4,55

**Tabela 5.** Wyniki badań odporności na działanie mrozu

Zarób nr	Ilość szkła w [%] m. k.	Ilość cementu [kg]	Ilość popiołu [kg]	Próbki $f_{F1}$ [MPa]	Próbki $f_{F2}$ [MPa]	Spadek wytrzym. $\Delta f_F$ [%]	Ubytek masy $\Delta m_F$ [%]
Z10	18	260	104	45,3	43,8	3	<5%
Z11	0	260	104	59,8	57,4	4	<5%
Z13	46	260	117	58,5	57,0	3	<5%
Z7	20	320	64	60,2	31,9	47	<5%

w mieszance Z7, która wynosiła 3,9%, a która w przypadku betonów z kruszywem do 16 mm powinna wynosić co najmniej 4,5%. Oceniając wyniki wytrzymałości na ściskanie – znaczny spadek wytrzymałości próbek zmrażanych, wpływ na ten stan mają dwa czynniki: zmiana struktury betonu w wyniku reakcji ekspansywnej alkaliów z krzemionką oraz dalszego zniszczenia na skutek zamrażania i rozmrażania. Natomiast betony próbek poddanych działaniu mrozu przygotowany z użyciem cementu CEM II/A-S 42,5 N w ilości 260 kg na 1 m<sup>3</sup> spełniły wymagania dotyczące mrozoodporności betonu. Spadek wy-

trzymałości  $\Delta f_F$  próbek zamrażanych  $f_{F2}$  w stosunku do porównawczych  $f_{F1}$  był nie większy niż 20% oraz ubytek masy  $\Delta m_F$  próbek zamrażanych nie większy niż 5% (tab. 5). Badania rozpoczęto po 90 dniach dojrzewania w komorze klimatycznej, temperatura +20°C i wilgotność >95%.

### 3.3. Badania reaktywności alkalicznej

Badania miały na celu rozpoznanie charakteru reaktywności alkalicznej w betonie zawierającym stłuczkę szklaną. Reakcja kruszywa zawierającego rozpuszczalną w alkaliach krzemionkę ASR zachodzi w roztworze zaczynu w porach betonu, prowadząc do silnej ekspansji, co jest przyczyną dalszej degradacji betonu, na co ma duży wpływ wilgotność i temperatura. Najsilniejsza ekspansja występuje w temperaturze pokojowej przy wilgotności względnej 80%, czemu towa-

rzyszy tworzenie się na powierzchni ziaren żelu krzemianów sodu i potasu [4]. Jednym z czynników decydujących o wystąpieniu reakcji alkaliów z kruszywem reaktywnym w betonie jest odpowiednio duża zawartość tlenków sodu i potasu, czyli alkaliów. Głównym źródłem alkaliów w betonie są: cement portlandzki, popiół

**Tabela 6.** Zawartość alkaliów w betonie w zależności od ilości cementu

Rodzaj cementu	Zawartość alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$	Zawartość alkaliów w betonie w zależności od ilości cementu [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]		
	[%]	320 kg	260 kg	200 kg
CEM I 42,5 R	1,02	3,3	2,7	2,0
CEM II/A-S 42,5 N	0,57	1,8	1,5	1,1
CEM II/A-V 42,5 N-NA	0,95	3,0	2,5	1,9
CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA	0,75	2,4	2,0	1,5
Dodatek mineralny		Dodatek w ilości 10% m. c.		
Popiół lotny (17% = 0,46)	2,72	+0,15	+0,12	+0,09

ze spalania węgla, alkalia z zewnętrznego środowiska (sól do odladzania, sól morska, zasolenie piasku). Zgodnie z tymi założeniami docelowo wybrano cement portlandzki żuźlowy rodzaju CEM II/A-S 42,5 N. Dodatkowo w celach poznawczych wykorzystano powszechnie dostępny cement portlandzki CEM I 42,5R, jako najbardziej zalecany do zastosowania w prefabrykacji. Niestety, badania potwierdziły, że cement ten wykazywał silną reakcję ASR.

W literaturze można znaleźć różną ocenę wpływu stłuczki szklanej na właściwości betonu. W opracowaniu [5] wykazano, że optymalna ilość stłuczki to 15–30% masy cementu, przy czym odnotowano niekorzystny wpływ na parametry wytrzymałościowe przy ilości stłuczki 30% m.c. i większej oraz potwierdzono korzystny wpływ na wnikanie wody przy zastosowaniu drobnego kruszywa szklanego 0/2 mm w składzie. W badaniach wykorzystano cement CEM I 42,5 R w ilości  $450 \text{ kg}/\text{m}^3$ , zastępując go spoiwem szklanym w ilości od 15 do nawet 90%. Stwierdzono, że żaden z tak zaprojektowanych betonów nie spełniał wymagań dotyczących mrozoodporności. Nie przedstawiono badań reakcji ASR. Badania własne autorów artykułu potwierdziły, że przy zastosowaniu cementu portlandzkiego żuźlowego rodzaju CEM II/A-S 42,5 N w ilości  $260 \text{ kg}/\text{m}^3$  oraz dodatku popiołu można uzyskać beton mrozoodporny dla stopnia F150 ze stłuczka szklaną w składzie mieszanki. Równie istotnym problemem jest reaktywność alkaliczna, której wpływ na parametry betonu przedstawiono w opracowaniu [6]. Wykazano w nim, że zastąpienie cementu w ilości 30% mieloną stłuczka szklaną nieznacznie wpływa na wzrost ekspansji spowodowanej reakcją ASR. W artykule zwrócono szczególną uwagę na skład i kolor stosowanej

stłuczki. Potwierdzono różne parametry betonu w zależności od rodzaju i parametrów stosowanej stłuczki. Wstępne mielenie stłuczki korzystnie wpływa na kształtowanie reakcji ASR. Korzystny wpływ dozowania stłuczki szklanej w postaci kruszywa drobnego lub proszku (glass powder) opisano w opracowaniu [7], w którym podsumowano szeroki zakres badań w tym zakresie. Efekt wpływu zastąpienia kruszywa naturalnego szkłem odpadowym na parametry wytrzyma-

łościowe oraz reaktywność przedstawiono również w opracowaniu [8]. Ogólnie rzecz biorąc, wyniki wykazały, że zastąpienie kruszywa naturalnego szkłem w ilości ponad 30% prowadzi do wzrostu wytrzymałości betonu na ściskanie, a optymalny procent zastąpienia kruszywa cząstkami szkła wynosi 50%. W składzie stosowano pył krzemionkowy, a frakcję piaskową zastępowano szkłem w ilości od 10 do 50%.

Zestawienie zawartość alkaliów w betonie w zależności od ilości i rodzaju cementu stosowanych w badaniach przedstawiono w tabeli 6, wraz z wynikami innych cementów i typowych dodatków. Do całkowitej ilości alkaliów w betonie należy dodać również alkalia zawarte w popiele lotnym. Przyjęto zachowawczo, że 17%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  stanowią alkalia z popiołu lotnego, dlatego całkowita ilość alkaliów w betonie powinna być zwiększona w zależności od dozowania popiołu. Zakładając ilość popiołu 30% masy cementu, ilość alkaliów zwiększy się o  $0,15 \text{ kg}/\text{m}^3$  w betonie z 320 kg cementu i o  $0,09 \text{ kg}/\text{m}^3$  w betonie z 200 kg cementu.

Mieszanki betonu z wysoką zawartością stłuczki szklanej ulegają reakcji zaczynu ze szkłem, dlatego skład mieszanki należy projektować tak, aby zawartość alkaliów w betonie była jak najmniejsza i nie przekraczała  $2,0 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Ponadto wykorzystano cement o potencjalnie niskiej zawartości aktywnych alkaliów, oraz taki, który jest zalecany do zastosowania w klasie ekspozycji odpowiedniej do produkcji drobnomiarowych wyrobów prefabrykowanych stosowanych w drogownictwie. Beton powinien być w głównej mierze odporny na agresję spowodowaną działaniem mrozu, środowiska agresywnego chemicznie oraz ścieranie.

W celu oceny reaktywności krzemionki przeprowadzono badania reaktywności alkalicznej zapraw cementowej z dodatkiem

**Tabela 7.** Skład zaprawy próbek poddanych badaniom ASR

Skład	A1 0G	A2 0G	A2 20G	A2 50G	A2 70G	A1 50G 30PL	A2 50G 30PL
CEM I 42,5 R	250	0	0	0	0	250	0
CEM II/A-S 42,5 N	0	250	250	250	250	0	250
Popiół lotny	0	0	0	0	0	75	75
Piasek 0/2 mm	562	562	450	281	169	281	281
Szkło 0/2 mm	0	0	112	281	393	281	281
Woda	118	118	118	118	118	118	118

A1 – cement CEM I; A2 – cement CEM II; 50G – szkło 50% kruszywa; 30PL – popiół lotny 30% cementu

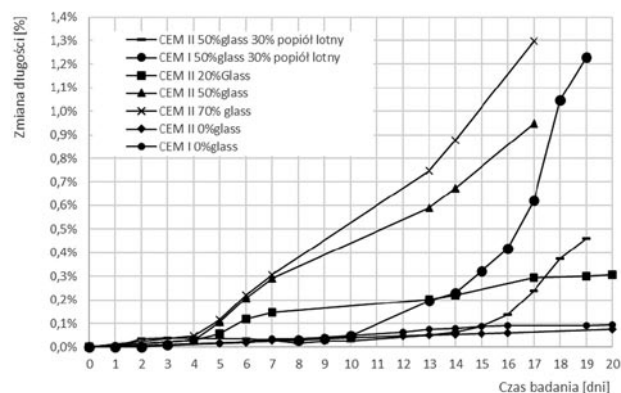
stłuczki szklanej, metodą przyspieszoną według procedury PB/1/18, [9]. Metoda ta przewiduje przygotowanie próbek o wymiarach 25x25x285 mm. Skład zaprawy powinien odpowiadać proporcjom cementu do kruszywa 1:2,25 (w tym przypadku mieszanki piasku i szkła frakcji 0/2 mm). Zastosowano współczynnik w/c równy 0,47, cement rodzaju CEM II/A-S 42,5 N oraz CEM I 42,5 R. W celu oceny skuteczności zapobiegania reaktywności alkalicznej przez dodatki typu II w składzie mieszanek zastosowano popiół lotny (PL). Beleczki zostały zanurzone w roztworze 1 M NaOH, w temperaturze +80°C na okres min. 14 dni. Skład mieszanki do przygotowania próbek zapraw przedstawiono w tabeli 7. Próbkę zaprawy oznaczone A1 0G i A2 0G były referencyjne (nie zawierały w składzie dodatku szkła).

Beleczki betonowe (A2 20G) wykonane z cementu CEM II/A-S 42,5N oraz piasku i 20% szkła, przechowywane w 1-molowym roztworze NaOH o temperaturze  $80\pm 2^{\circ}\text{C}$ , wykazały po 14 dniach zmiany liniowe równe średnio 0,22%, a po 20 dniach 0,31%. Beleczki betonowe (A2 50G) wykonane z cementu CEM II/A-S 42,5 N oraz piasku i 50% szkła, wykazały po 14 dniach zmiany liniowe równe średnio 0,59%, a po 17 dniach 0,95%. Beleczki z tej samej klasy cementu i 70% ilością szkła (A2 70G), wykazały po 14 dniach zmiany liniowe równe średnio 0,88%, a po 17 dniach aż 1,30%. Beleczki (A1 50G 30PL) wykonane z cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R, piasku i 50% szkła oraz dodatku popiołu lotnego (PL) w ilości 30% masy cementu, przechowywane w roztworze NaOH o temperaturze  $80\pm 2^{\circ}\text{C}$ , wykazały po 14 dniach zmiany liniowe równe średnio 0,23%, a po 19 dniach aż 1,22%. Beleczki betonowe (A2 50G 30PL) wykonane z cementu portlandzkiego CEM II/A-S 42,5N, piasku i 50% szkła oraz dodatku popiołu lotnego (PL) w ilości 30% masy cementu, przechowywane w roztworze NaOH w temperaturze  $80\pm 2^{\circ}\text{C}$ , wykazały po 14 dniach zmiany liniowe równe średnio 0,06%, a po 19 dniach aż 0,46%. Porównując wyniki próbek z dodatkiem popiołu lotnego do próbek bez tego dodatku, można stwierdzić, że wpływa on znacząco na zmniejszenie zmian długości próbki. W odniesieniu do wyników po 14 dniach badania, odnotowano 10-krotnie mniejsze wydłużenie (0,59–0,06%) próbek z popiołem lotnym w składzie, a po 19 dniach już tylko 2-krotnie mniejsze (1,52–0,46%). Wykresy wszystkich próbek pokazano na rysunku 3

#### 4. Podsumowanie

Badania potwierdziły, że kruszywo szklane z recydingu może być stosowane w produkcji betonowych drobnych elementów niekonstrukcyjnych. Uzyskane wyniki badań potwierdzają odporność betonu na agresję spowodowaną działaniem mrozu i ścieraniem. Mimo spełnienia wymagań trwałościowych, decydującym czynnikiem związanym z betonem jest niska odporność na reakcję alkalia-krzemionka.

• Beton z dodatkiem szkła z recydingu w składzie jest silnie reaktywny. Badania reaktywności alkalicznej na próbkach zaprawy zarówno z cementem portlandzkim, jak i żuźlowym oraz



Rys. 3. Wykres zmian długości próbek w czasie dla różnych rodzajów cementów

dodatkiem szkła frakcji 0/2 mm wykazały zmiany próbek przekraczające wartości graniczne. Dodatek popiołu lotnego znacznie ogranicza reakcje ASR. Niekorzystny wpływ miały drobne cząstki szkła, które wzmagają reakcję kruszywa zawierającego rozpuszczalną w alkaliach krzemionkę w betonie. Dlatego udział stłuczki szklanej należy ograniczyć do 20% masy kruszywa.

- Nie zaleca się stosowania cementu portlandzkiego rodzaju CEM I 42,5 R o wysokiej zawartości alkaliów. Tym samym należy wykluczyć stosowanie cementów wysoko alkalicznych, których ilość w przeliczeniu na  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  przekracza 0,6%.
- Przy ograniczeniu ilości alkaliów w betonie do maksimum  $1,5 \text{ kg/m}^3$  i projektowaniu mieszanki z dodatkiem szkła ilość cementu niskoalkalicznego należy ograniczyć do  $250 \text{ kg/m}^3$ .
- Stłuczka szklana wpływa na obniżenie wytrzymałości na ściskanie. Można jednak projektować beton z ilością cementu w składzie  $260 \text{ kg/m}^3$ , którego wytrzymałość będzie znacząco większa niż 40 MPa po 56 dniach dojrzewania.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Program budowy 100 obwodnic na lata 2020–2030, dostęp (online) Program budowy 100 obwodnic na lata 2020–2030 – Ministerstwo Infrastruktury – Portal Gov.pl (www.gov.pl).
- [2] Szruba M., Kruszywa w budownictwie drogowym i kolejowym, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne 3–4/2020
- [3] Dąbrowski M., Wpływ dodatku popiołów lotnych wapiennych na mikrostrukturę i mrozoodporność kompozytów o matrycach cementowych, rozprawa doktorska, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polska Akademia Nauk Pracownia Pól Odształceń, 2016
- [4] Kurdowski W., Chemia cementu i betonu, Wydawnictwo Polski Cement, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2010
- [5] Jackiewicz-Rek W., Kopytko M., Opłocka E., Wpływ stłuczki szklanej z recydingu na wytrzymałość i trwałość betonu, Inżynieria i Budownictwo 9/2019
- [6] Najduchowska M., Pabiś E., Rolka G., Baran T., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie, Właściwości betonu z zastosowaniem stłuczki szklanej, Dni Betonu, 2016
- [7] Hama S. M., Nawar M. T., Al-Hadithi A. I., Beneficial role of glass wastes in concrete – a review, Journal of Engineering and Sustainable Development, tom 22, 3/2018
- [8] Dabiri H., Sharbatdar M.K., Kavyani A., Baghdadi M., The Influence of Replacing Sand with Waste Glass Particle on the Physical and Mechanical Parameters of Concrete. Civil Engineering Journal, tom 4, 7/2018
- [9] Procedura badawcza GDDKiA PB/1/18 (czerwiec 2019 r.), Instrukcja badania reaktywności kruszywa metodą przyspieszoną w 1 M roztworze NaOH w temperaturze  $80^{\circ}\text{C}$