

Projektowanie zapraw cementowych o optymalnej urabialności i stabilności na konkurs ACI –Mortar Workability 2024

Design of cement mortars with optimal workability and stability for the ACI – Mortar Workability 2024 competition

dr inż. Norbert Olczyk (ORCID: 0000-0002-4261-4946), Wiktoria Góra, Adrian Góralski, Karolina Iwańska, Maciej Jaczyński, Kacper Kaźmierczak, Alicja Żygadło – studenci, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

DOI: 10.5604/01.3001.0054.6380

Streszczenie: Artykuł przedstawia proces projektowania i wykonywania zaprawy cementowej o optymalnej urabialności, spełniającej regulaminowe kryteria konkursu „Mortar Workability 2024” organizowanego przez American Concrete Institute (ACI) w Nowym Orleanie w USA, dotyczące właściwości reologicznych, parametrów ekologicznych i ekonomicznych.

Słowa kluczowe: zaprawa, urabialność, stabilność, płynność, ślad węglowy, koszt.

Abstract: The article presents the process of designing and manufacturing a concrete mortar with optimal workability, meeting the regulatory criteria of the „Mortar Workability 2024” competition, concerning rheological properties of cement-based mixtures. The event is organized by the American Concrete Institute (ACI) in New Orleans USA.

Keywords: mortar, workability, fluidity.

1. Wprowadzenie

Intensywny rozwój technologii betonu w ostatnich dwóch dekadach, będący wynikiem modyfikacji jego składu poprzez zastosowanie szerokiej gamy dodatków mineralnych i domieszek chemicznych, jest odpowiedzią branży budowlanej na poszukiwanie betonu o znacznie wyższej trwałości w stosunku do betonów tradycyjnych. Rozwój betonów zwykłych i lekkich wysokiej wytrzymałości, betonów samozagęszczalnych, fibrobetonów, czy betonów o ultra wysokiej wytrzymałości, popularnie zwanych betonami nowej generacji, to pełna rewolucja w technologii betonów. Amerykański Instytut Betonu (ACI) jest na pewno światowym liderem wprowadzającym te innowacje do przemysłu betonowego.

Na tegorocznej konwencji ACI w Nowym Orleanie przed studenckimi zespołami z całego świata postawiono zadanie zaprojektowania zaprawy spełniającej zadane kryteria. Zazwyczaj priorytetowym zagadnieniem przy projektowaniu receptur przez technologów jest osiągnięcie określonych parametrów stwardniałej zaprawy. Osobnym zagadnieniem jest sposób jej aplikacji w stanie świeżym. W przypadku omawianego przedsięwzięcia zadanie polegało na skupieniu uwagi przede wszystkim na urabialności zaprawy, czyli na zapewnieniu odpowiedniej płynności,

podatności na formowanie oraz odporności na segregację i samoistny wyciek wody (stabilność). Głównymi czynnikami wpływającymi na urabialność są: stosunek w/c , wielkość i charakterystyka ziaren kruszywa, zastosowanie dodatków mineralnych oraz domieszek chemicznych [1]. Wysoki współczynnik w/c prowadzi do zwiększenia płynności mieszanki, co wpływa na łatwość układania, ale może przyczynić się do segregacji składników i znacznego obniżenia wytrzymałości zaprawy, co negatywnie wpływa na jakość finalnego produktu [2]. Powierzchnia właściwa kruszywa oraz innych sypkich składników wpływa na wodożądność zaprawy, co z kolei determinuje jej konsystencję [3]. Ponieważ kruszywo stanowi znaczną część sumarycznej objętości zaprawy, należy wykonać krzywą przesiewu i precyzyjnie dostosować proporcje poszczególnych frakcji do osiągnięcia pożądanej konsystencji i odpowiedniej jakości produktu [1]. Innowacyjne technologie oraz rozwój badań naukowych przyczyniają się do ciągłego poszerzania gamy dostępnych domieszek chemicznych i ich zastosowań. Najczęściej wykorzystywanymi w zaprawach i betonach domieszkami są superplastyfikatory, które pozwalają na zmniejszanie ilości wody potrzebnej do uzyskania odpowiedniej konsystencji. Często są one stosowane razem z VMA, czyli z domieszką zwiększającą więźliwość wody, zapobiegającą zjawisku

„bleedingu”. Natomiast domieszki napowietrzające oddziałują na urabialność poprzez wywołanie w strukturze matrycy mikroskopijnych pęcherzyków powietrza [4].

Kolejnym wyzwaniem było uwzględnienie w projektowaniu emisyjności CO₂ podczas procesu produkcji wykorzystanych składników i ich kosztu. Organizacje, takie jak American Concrete Institute (ACI), koncentrują się na zwiększaniu świadomości na temat ograniczania emisji CO₂ związanej z produkcją betonu. W konkursach architektonicznych i inżynierskich coraz częściej pojawiają się kategorie, np. GWP (*Global Warming Potential*), służące ocenie wpływu materiałów budowlanych na środowisko. Projektowanie zapraw o niskim śladzie węglowym jest zadaniem czasochłonnym, ponieważ wymaga redukcji zawartości klinkieru portlandzkiego w cemencie na rzecz dodatków, które mogą zmniejszyć emisję CO₂. W związku z wprowadzaniem nowych dyrektyw dotyczących zagadnień związanych ze zrównoważonym rozwojem oraz niską emisyjnością dwutlenku węgla przy projektowaniu konkursowej zaprawy trzeba było uwzględnić emisyjność GWP [5]. Przemysł budowlany jest w czołówce pod względem emisyjności śladu węglowego na świecie [6].

W artykule opisano proces projektowania i produkcji zaprawy, która uwzględni wszystkie te aspekty i spełnia wymogi regulaminowe konkursu.

2. Kryteria regulaminowe konkursu – przyjęte założenia

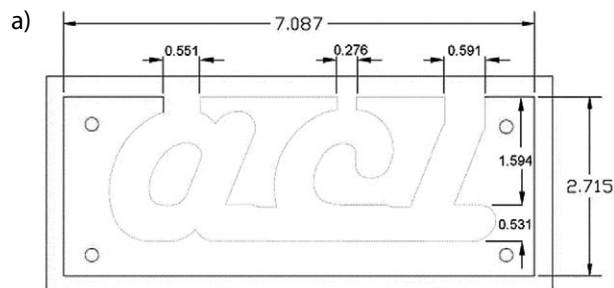
Zadaniem konkursowym, z którym zmierzali się autorzy artykułu, było zaprojektowanie zaprawy cementowej o optymalnej płynności i stabilności zachowując jednocześnie niską cenę mieszanki sumaryczny niski ślad węglowy wykorzystanych składników. Recepturę zaprawy sporządzono zgodnie z wymaganiami konkursu, a najważniejsze ograniczenia regulaminowe sformułowano następująco:

- maksymalny stosunek woda/spoiwo wynosi 0,50,
- co najmniej 50% masy materiałów proszkowych musi stanowić cement,
- kruszywo stanowi minimum 60% masy zaprawy zgodnie z klasyfikacją ASTM C33,
- frakcja kruszywa w zakresie 0–4,75 mm, zgodnie z danymi z tabeli 1.

Tabela 1. Wymagania dotyczące drobnego kruszywa [3]

Rozmiar sita		Przeszło [%]
4,75 mm	(No.4)	95 do 100
2,36 mm	(No.8)	80 do 100
1,18 mm	(No.16)	50 do 85
600 μm	(No.30)	25 do 60
300 μm	(No.50)	5 do 30
150 μm	(No.100)	0 do 10

Zaprojektowana zaprawa powinna charakteryzować się bardzo dobrą płynnością i jak najszybciej wypełnić specjalną formę. Geometria formy została precyzyjnie określona w regulaminie konkursu (rys. 1). Na potrzeby badań laboratoryjnych opracowano model formy, a następnie wydrukowano ją na drukarce 3D, aby prowadzić badania płynności zaprawy w warunkach jak najbardziej zbliżonych do tych, które występowały w trakcie konkursu.



Rys. 1. Forma konkursowa: a) wymiary formy w calach [7], b) wydrukowana forma

Konkurs Mortar Workability został podzielony na trzy kategorie: Overall Efficiency, Ecological Design oraz Economical Design. W pierwszej, głównej kategorii, zwanej Overall Efficiency oceniano zaprawy, zgodnie ze wzorem (1). Aby uzyskać sumaryczny, wysoki wynik punktowy, każdy zespół musiał wykazać się wysokim wynikiem we wszystkich punktowanych zadaniach, którym przypisano odpowiednie wagi. Obejmowały one test płynności, test stabilności, sporządzenie raportu z badań laboratoryjnych, określenie emisyjności CO₂ przy produkcji składników zaprawy oraz ich kosztu. Ta złożona ocena pozwalała na wszechstronną ocenę efektywności zaprojektowanej zaprawy.

$$\text{Overall Efficiency Score} = (0,50)(F) + (0,20)(S) + (0,15)(R) + (0,10)(GWP) + (0,05)(C) \quad (1)$$

gdzie:

F – wynik z testu płynności (czas wypełnienia formy),

S – wynik z testu segregacji (stabilności),

R – ocena wysłanego wcześniej raportu z badań,

GWP – wynik obliczenia śladu węglowego całej zaprawy,

C – cena zaprawy.

Rys. 2. Krzywa uziarnienia kruszywa naturalnego dla mieszanki konkursowej

Aby zakwalifikować się do pozostałych kategorii, mieszanka musiała spełnić dwa kryteria. Po pierwsze, trzeba było wykazać 100% wypełnienie formy, co stanowiło istotny element oceny, po drugie, stabilność mieszanki nie mogła wynosić mniej niż 95%.

Punktację w obu kategoriach obliczano na podstawie zsumowania ceny oraz emisyjności zastosowanych składników na m³ zarobu.

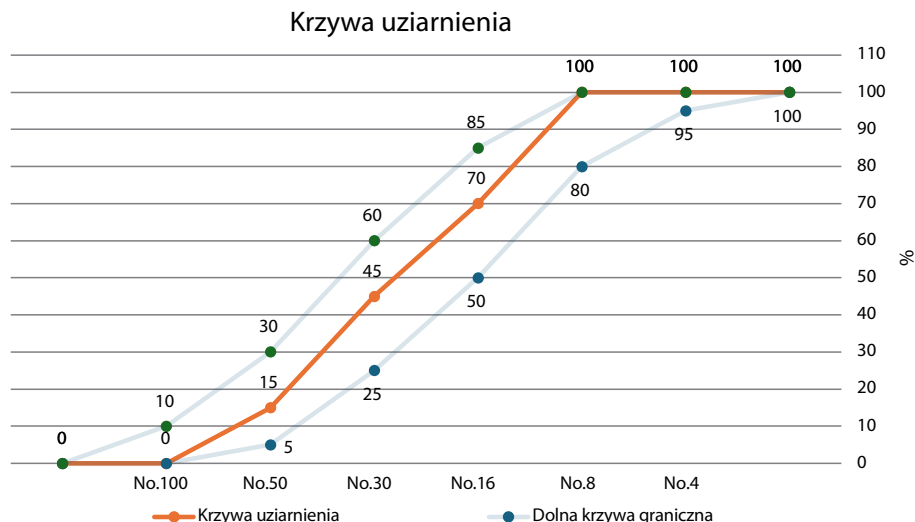
Ceny jednostkowe poszczególnych składników zostały zawarte w regulaminie konkursu [6]. W konkursie dopuszczono możliwość stosowania składników spoza listy materiałowej pod warunkiem kompleksowego udokumentowania ceny materiału oraz jego emisyjności.

3. Projektowanie zaprawy

Głównym wyzwaniem podczas całego procesu projektowania było zachowanie stabilności zaprawy przy jednoczesnym zapewnieniu jej odpowiedniej płynności. W celu usprawnienia procesu projektowania zaprawy, opracowano arkusz kalkulacyjny, w którym uwzględniono wszystkie wymagania stawiane przez regulamin konkursu. Dzięki temu możliwe było dokładne monitorowanie wpływu poszczególnych składników na wynik punktacji oraz analizę kosztów i emisji CO₂. Wykonanie arkusza pozwoliło na kompleksową ocenę efektywności i zgodność z założeniami konkursowymi, jednocześnie ograniczając ilość badanych mieszanek tylko do tych, które generują wysoki wynik punktowy. Niemniej jednak w ramach prac laboratoryjnych przeprowadzono badania blisko 100 różnych mieszanek.

Podstawowymi składnikami użytymi do wykonania mieszanki konkursowej były: cement portlandzki CEM I 52,5 R, żużel wielkopiecowy, wapno hydratyzowane, kruszywo naturalne o frakcji do 2 mm, domieszka VMA, superplastyfikator, napowietrzacz i woda. Z uwagi na charakter przedsięwzięcia dokładnego składu zaprawy nie przedstawiono.

Rys. 3. Wpływ modyfikacji zaprawy w odniesieniu do wytycznych konkursowych



Duża ilość kruszywa, względem pozostałych składników, miała istotny wpływ na reologię projektowanej zaprawy. Stosowanie kruszywa o frakcji 2–4 mm powodowało zatykanie się leja i powstawanie zatorów na zakrętach formy. Zwiększenie ilości drobnego kruszywa poprawiło wynik testu stabilności, ale znacząco pogorszyło konsystencję zaprawy i wydłużyło czas płynięcia. W projektowanej mieszance zbilansowano frakcje kruszywa (rys. 2) tak, aby uzyskać jak najniższe zapotrzebowanie na wodę przy jednoczesnym uniknięciu niepożądanych efektów wynikających z zastosowania danej frakcji.

Każda zmiana ilościowa jednego ze składników poprawiała jeden parametr, często pogarszając drugi np. przy poprawie płynności rosła cena zaprawy i zwiększał się ślad węglowy. Graficzne przedstawienie wpływu modyfikacji poszczególnych składników na proces ustalenia ostatecznej receptury zaprawy obrazuje rysunek 3.

Właściwości 10 wybranych mieszanek zestawiono w tabeli 2. Analiza zmian w składzie pozwoliła na dostosowanie receptury do wymagań konkursowych oraz osiągnięcie optymalnych parametrów zaprawy.

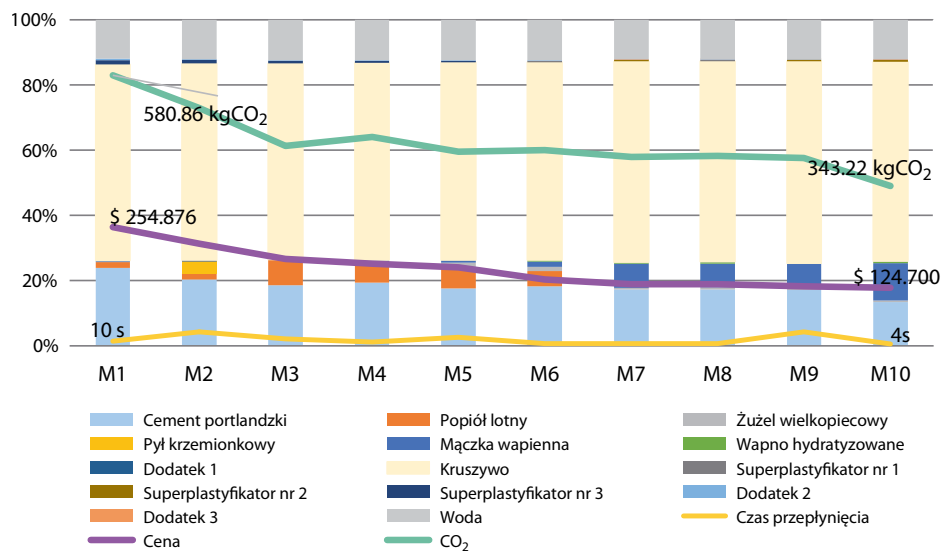
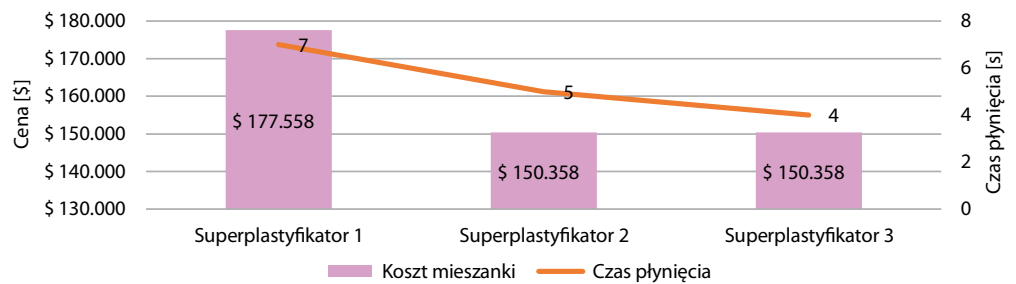
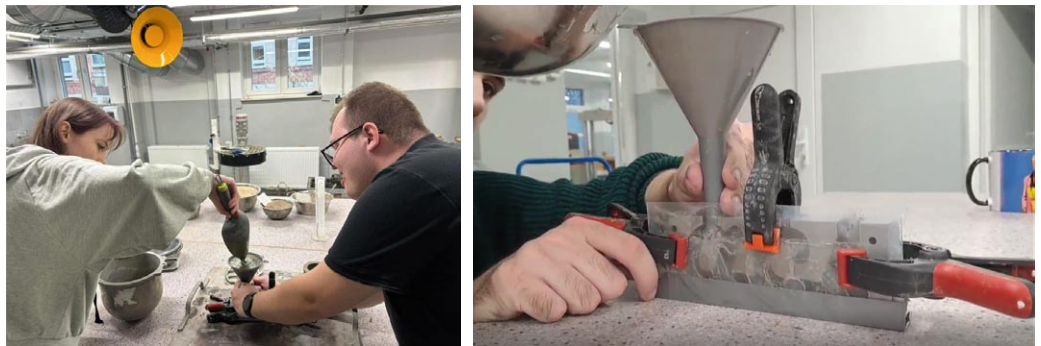


Tabela 2. Charakterystyki badanych mieszanek

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
w/s	0,5	0,489	0,491	0,49	0,487	0,494	0,498	0,497	0,497	0,482
Czas płynięcia [s]	10	30	15	8	18	5	4,5	5	30	4
Segregacja [mm]	250	200	230	220	237,5	225	230	250	230	250
Cena [\$]	254,88	219,70	186,38	176,52	168,26	142,33	132,39	132,11	127,62	124,24
CO ₂ [kgCO ₂ /m ³]	580,86	510,23	428,96	448,01	416,33	420,69	405,74	408,18	402,93	346,55

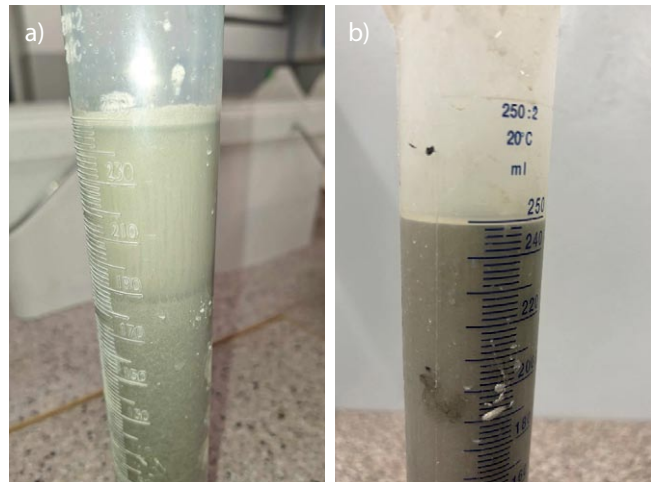
Rys. 4. Wpływ wybranych superplastyfikatorów na czas przepływu przez formę i cenę zaprawy**Rys. 5.** Wykonywanie testów płynności

Maksymalna wartość wskaźnika w/s była odgórnie narzucona przez regulamin konkursu i wynosiła 0,5. W celu dodatkowego upłynnienia mieszanki zastosowano superplastyfikator. Przeprowadzono badania na kilkunastu różnych rodzajach tej domieszki chemicznej. Ostatecznie w badaniach skoncentrowano się na trzech superplastyfikatorach. Zestawienie zależności czas płynięcia – cena przedstawiono na rysunku 4.

4. Przeprowadzone badania

Aby zapewnić jednolite warunki przygotowywania zapraw, opracowano szczegółową instrukcję dotyczącą mieszania, która obejmowała m.in. ustaloną kolejność dodawania składników oraz tolerancję ich odmierzenia, czas mieszania oraz obroty mieszalnika.

Podczas prac w laboratorium przeprowadzono testy płynności (rys. 5) oraz segregacji (rys. 6). Test płynności polegał na przelaniu zaprawy do formy, której geometrię określał regulamin (rys. 1), przez lejek z otworem o średnicy 12 mm. Lejek napełniano zaprawą, następnie umieszczano nad otworem litery „a”. Zaprawa była aplikowana do formy za pomocą siły grawitacji, a cały proces był rejestrowany cyfrowo, w celu określenia czasu trwania testu. Zarejestrowane dane pozwalały na obserwację i identyfikację ewentualnych problemów z płynnością mieszanki.

**Rys. 6.** Test segregacji po 30 minutach: a) początkowe próby, b) zaprawa konkursowa

Test segregacji (rys. 6) z wykorzystaniem cylindra pomiarowego polegał na przelaniu 250 ml gotowej mieszanki do menzurki i po upływie 30 minut dokonanie odczytu poziomu segregacji. Ta metoda umożliwiała monitorowanie zmian w strukturze zarobu oraz ocenę wpływu dozowania poszczególnych składników na segregację.

Rys. 7. Przebieg konkursu: a) weryfikacja materiałów przez sędziego, b) proces przygotowywania mieszanki



5. Zmagania i wyniki konkursowe

Zgodnie z przepisami konkursowymi uczestnicy mieli obowiązek dostarczenia odmierzonych składników niezbędnych do przygotowania zaprawy na konkurs w celu odtworzenia prac laboratoryjnych pod nadzorem sędziów. Jedyny wyjątek stanowiły domieszki, których określoną w raporcie z badań ilość, można było odmierzyć w trakcie trwania konkursu. Choć uczestnicy podejmowali wszelkie możliwe działania, aby warunki, w których opracowywano skład mieszanki jak najbardziej odpowiadały warunkom konkursowym, nie mogli precyzyjnie określić, w jaki sposób znaczne różnice w środowisku i wilgotności otoczenia wpłyną na właściwości ostatecznego zarobu. Organizatorzy zapewniali mieszalniki niezbędne do przygotowania zaprawy jednakże, modele wykorzystywane w Stanach Zjednoczonych, różniły się parametrami od tych wykorzystywanych w laboratorium uczelnianym.

Podczas konkursu sędziowie sprawdzali czy materiały przywiezione przez zespół zgadzają się z wcześniej załączonym raportem. Przeprowadzano również test wilgotności powierzchniowej kruszywa według ASTM C128.

Po weryfikacji materiałów (rys. 7a) i stwierdzeniu ich zgodności z wymaganiami drużyna została dopuszczona do udziału w konkursie. Dwie wyznaczone osoby z zespołu przystąpiły do przygotowania zaprawy na miejscu (rys. 7b) pod ścisłym nadzorem sędziów. Uczestnicy mieli do dyspozycji 10 minut na wykonanie zarobu. Był to moment wymagający skupienia, szybkiej reakcji oraz umiejętności radzenia sobie ze stresem, mający kluczowe znaczenie dla osiągnięcia sukcesu w konkursie.

Po wykonaniu zarobu sędziowie podzielili go na dwie części: jedna została przeznaczona do przeprowadzenia testu przepływu przez formę, a druga do sprawdzenia segregacji. W konkursie mieszanka wypełniła formę w imponującym czasie 8,5 sekundy. Jak widać na rysunku 4 i 5, czas płynięcia

przez formę w laboratorium był jeszcze krótszy bo wynosił blisko 4 sekundy. Niemniej jednak uzyskany wynik wystarczył, aby sięgnąć po wygraną. Ponadto nie stwierdzono żadnych objawów segregacji. Weryfikacja składu dostarczonej receptury przez sędziów pozwoliła na ustalenie kosztu składników niezbędnych do wykonania mieszanki w wysokości 124,24\$/m³ oraz jej ślad węglowy GWP na poziomie 346,55 kgCO₂/m³, co było zgodne z oczekiwanymi uczestników (tab. 2). Weryfikacja wytrzymałości zaprawy na ściskanie nie była objęta zadaniem konkursowym.

6. Podsumowanie

Zaprojektowana zaprawa jest niestandardowa z uwagi na płynną konsystencję. Szukając możliwego zastosowania można uznać, że nadaje się do iniekcji trudno dostępnych ubytków murowych wewnątrz grubości muru, bez konieczności jego rozbiórki lub wypełnień innego rodzaju ubytków, gdzie duża płynność i brak segregacji będzie odgrywał główną rolę. Niemniej jednak należy szczerze sobie powiedzieć, że przy konkretnym zastosowaniu niezbędne będzie wykonanie dodatkowych badań weryfikujących jej przydatność do zastosowania w danym celu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Z. Jamroży, „Beton i jego technologie, PWN Warszawa 2019
- [2] A. Książek, „Właściwości użytkowe kruszyw i ich wpływ na jakość betonu, „Surowce i Maszyny Budowlane” (4/2017)
- [3] Vademecum Technologia Betonu, Góraźdże 2016
- [4] K. Michalik, Domieszki do betonów w praktyce budowlanej, Inżynier Budownictwa 06/2015
- [5] A. Kuczera, M. Płoszaj-Mazurek, Mapa drogowa dekarbonizacji budownictwa do roku 2050, PLGBC 2021
- [6] Cuihong Chen, Ruochong Xu, Dan Tong, Xinying Qin, Jing Cheng, Jun Liu, Bo Zheng, Liu Yan and Qiang Zhang, A striking growth of CO₂ emissions from the global cement industry driven by new facilities in emerging countries, Environmental Research Letters 2022
- [7] Regulamin konkursu Mortar Workability 2024