

dr inż. Damian Dziuk¹⁾
dr inż. Artur Golda¹⁾
dr inż. Katarzyna Synowiec¹⁾
mgr inż. Patryk Wolny¹⁾
mgr inż. Michał Zapła²⁾

¹⁾ Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o., Heidelberg Materials Polska

²⁾ Master Builders Solutions Polska

Kształtowanie pompowalności mieszanek betonowych wykonanych z cementów niskoemisyjnych

Pumpability development of fresh concrete made with low-carbon cement

Streszczenie

Krajowe doświadczenia wykonywania betonowych elementów monolitycznych, wskazują, że najpowszechniej stosowanym sposobem układania mieszanki betonowej jest podawanie pompą bezpośrednio z betonomieszarki, a zatem czynnikiem kluczowym dla prawidłowego przebiegu prac jest pompowalność mieszanki betonowej. Realnym problemem staje się jednak sposób określenia pompowalności na etapie projektowania mieszanki betonowej i badań wstępnych.

Oczywistym zdaje się, że mieszanka betonowa musi mieć odpowiednie proporcje, aby z łatwością i równomiernie przepływać przez rurociąg. Powinna zawierać odpowiednią ilość frakcji drobnych, zarówno w spoiwie, jak i stosie okruszowym kruszywa, aby sprzyjać powstawaniu tzw. warstwy poślizgowej. Bardzo istotna jest zatem właściwa reologia mieszanki, z jednej strony pożądana jest wysoka konsystencja, żeby ułatwić przemieszczanie się mieszanki, z drugiej strony wysoka kohezja, spójność, żeby nie dopuścić do segregacji.

Co zatem sprawia, że mieszanka betonowa nadaje się do pompowania, i jak tę zdolność określić?

W artykule opisano próbę oceny pompowalności mieszanki betonowej z użyciem nowego urządzenia pomiarowego SLIPER (SLiding Pipe Rheometer), opracowanego we współpracy zespołów Putzmeister i Schleibinger Geraete. Urządzenie Sliper ma pozwolić szybko ocenić charakterystykę pompowalności mieszanki betonowej w laboratorium, a nawet na budowie jeszcze przed podaniem. Badaniom poddano mieszanki betonowe przygotowane z cementu CEM II/B-M (S-LL) 42,5N i porównano z mieszanką referencyjną (CEM I 42,5R). Ocenie poddano wpływ uziarnienia piasku oraz poziom dozowania domieszki upłynniającej i stabilizującej. Analizowano również wyniki badań konsystencji mieszanki betonowej metodą opadu stożka, lepkości i granicy płynięcia oznaczonych przy użyciu reometru ICAR Plus.

Abstract

Domestic experience in the execution of monolithic concrete elements indicates that the most widely used method of placing concrete mix is pump feeding directly from the mixer truck. Therefore, a key factor for the proper progress of work is the pumpability

of the concrete mix. However, a real challenge becomes how to determine the pumpability at the stage of mix design and preliminary testing.

It seems obvious that the concrete mix must have appropriate proportions to flow easily and uniformly through the pipeline. It should contain a sufficient amount of fine particles, both in the binder and in the aggregate, to promote the formation of the so-called slip layer. Thus, proper rheology of the mix is crucial: on one hand, high consistency is desired to facilitate movement, and on the other hand, high cohesion is needed to prevent segregation.

So what makes a concrete mix pumpable, and how can this ability be assessed?

The paper describes an attempt to evaluate the pumpability of a concrete mix using a new measuring device called SLIPER (SLiding Pipe RhEometeR), developed in cooperation between Putzmeister and Schleibinger Geraete. The SLIPER device is intended to quickly assess the pumpability characteristics of a concrete mix in the laboratory or even on-site before pumping.

Concrete mixes prepared with CEM II/B-M (S-LL) 42,5N cement were tested and compared with a reference mix (CEM I 42,5R). The influence of sand gradation and the dosage level of superplasticizing and stabilizing admixtures was evaluated. The results of consistency tests using the slump method, as well as viscosity and yield stress measured with the ICar rheometer, were also analyzed.

1. Wstęp

Jednym z kluczowych aspektów zrównoważonej transformacji budownictwa jest redukcja śladu węglowego materiałów budowlanych, zwłaszcza betonu, który odgrywa istotną rolę w globalnej gospodarce. W związku z tym coraz częściej akceptowane i stosowane są cementy wieloskładnikowe, charakteryzujące się niższą emisją CO₂, stanowiące realną alternatywę dla tradycyjnego cementu portlandzkiego [1].

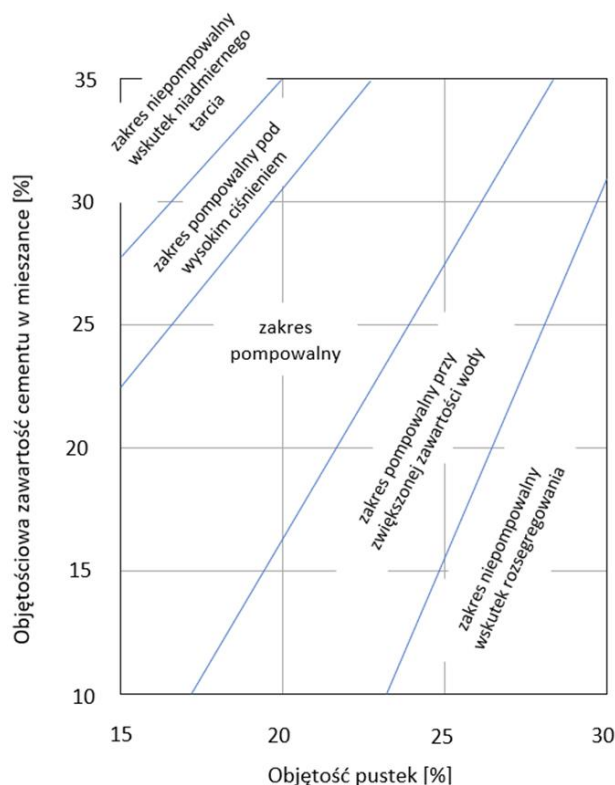
Projekt receptury mieszanki betonowej uzależniony jest od właściwości stwardniałego betonu, które powinny zostać osiągnięte po wyznaczonym okresie dojrzewania. Wytrzymałość oraz klasy ekspozycji w dużym stopniu wpływają na decyzję o ilości cementu, wody czy też rodzaju domieszki chemicznej. Natomiast sposób podania mieszanki betonowej, zastosowana technologia zabudowy oraz klasa konsystencji mają istotny wpływ na dobór proporcji kruszyw, uziarnienie, a także na ilość stosowanej domieszki [1, 2]. Najczęściej stosowanym sposobem transportu mieszanki betonowej na miejsce zabudowy jest podawanie pompą do betonu. Technika ta została powszechnie przyjęta przez branżę budowlaną, ponieważ umożliwia znacznie szybsze podawanie mieszanki betonowej, co bezpośrednio przekłada się na zwiększenie tempa realizacji robót [3]. Pomimo tego, że pompowanie jest najczęściej wybieraną metodą podawania mieszanki betonowej, należy uwzględnić również szereg ograniczeń związanych z koniecznością zachowania zdolności mieszanki betonowej do przepływu przez rurociąg (rys. 1), bez segregacji składników i z zachowaniem odpowiednich właściwości roboczych. Pompowanie betonu stanowi złożone zadanie i może wiązać się z potencjalnym zagrożeniem, wynikającym z ryzyka zablokowania pompy lub uszkodzenia rurociągu [3]. Na podstawie doświadczeń opracowano praktyczne wytyczne do projektowania mieszanek betonowych uwzględniające aspekt pompowalności [1, 2, 3].



Rys. 1. Charakterystyki przepływu w strefach na przekroju rurociągu (a) naprężenia ścinające (b) szybkość ścinania, (c) profil prędkości w rurociągu. Strefa 1 przepływ mieszanki betonowej, przy naprężeniu ścinającym niższym od granicy płynięcia. Strefa 2 obrazuje naprężenia ścinające w mieszance betonowej. (LL) warstwa smarująca [2]

Podczas transportu mieszanki betonowej przez rurociąg pompy, tworzą się trzy strefy o różnej prędkości przepływu. Warstwa smarująca (LL) złożona z najdrobniejszych frakcji betonu powstaje w strefie przypowierzchniowej wskutek przesunięcia kruszywa o większym wymiarze w kierunku środka rurociągu w wyniku działania siły ścinającej. W obszarze, w którym naprężenia ścinające są niższe niż granica płynięcia, szybkość ścinania maleje do zera (rys. 1 – strefa 1) i formuje się obszar przepływu tłokowego. Jest to strefa, w której prędkość przepływu dla poszczególnych składników mieszanki jest taka sama. Pomiedzy strefą przepływu tłokowego, a warstwą smarującą pojawia się strefa ścinania (rys. 1 – strefa 2), która w przypadku wysokiej granicy płynięcia może się nie pojawić podczas pompowania [2].

Projektowanie mieszanek pompowalnych sprowadza się zasadniczo do doboru stosu okruszowego kruszywa, o możliwie małej objętości pustek międzyziarnowych, które powinny wypełnić spoiwo (rys. 2). Przy zawartości pustek powyżej 30% spełnienie warunku pompowalności może okazać się niemożliwe, nawet przy wysokiej ilości cementu (spoiwa). Z drugiej strony zbyt duża zawartość cementu, nawet przy niskiej ilości pustek, w konsekwencji również generuje trudności na etapie transportu mieszanki rurociągiem [1]. Zastosowanie naturalnego kruszywa żwirowego jest korzystniejsze z punktu widzenia pompowalności, jednak przy odpowiedniej ilości zaprawy użycie kruszywa łamanego nie stanowi istotnej bariery. Ważnym czynnikiem jest również kształt ziaren kruszywa, który powinien być zbliżony do kubicznego. Wykorzystanie kruszywa frakcjonowanego o większym maksymalnym wymiarze ziarna, umożliwia zaprojektowanie stosu okruszowego o niższej zawartości pustek, co wymaga mniejszej zawartości zaprawy [1, 2, 4].



Rys. 2. Zakres pompowności mieszanki betonowej [1]

Dobór piasku zawierającego odpowiednią ilość frakcji drobnych staje się kluczowy, szczególnie w przypadku specjalnych zastosowań, takich jak betony napowietrzane dla potrzeb infrastruktury czy też mieszanki dla robót geotechnicznych. W praktyce za piaski trudne w zastosowaniu w betonie uznaje się te, w których zawartość frakcji przechodzących przez sito 0,25 mm wynosi poniżej 8%, a frakcji przechodzących przez sito 0,125 mm wynosi poniżej 0,8% [4]. Z drugiej strony, nadmierna ilość drobnych frakcji – powyżej 20% dla sita 0,25 mm oraz powyżej 1,5% dla sita 0,125 mm – znacząco zwiększa wodożądność całego układu ziarnowego, co wpływa niekorzystnie na lepkość mieszanki betonowej [4]. Stosowanie cementów portlandzkich wieloskładnikowych przyczynia się do poprawy pompowności. Podobnie jak w przypadku kruszywa, wodożądność spoiwa nie pozostaje bez wpływu na lepkość mieszanki, co jest kluczowe dla betonów o niskim współczynniku w/c [5]. Za najkorzystniejsze z punktu widzenia lepkości uznaje się domieszki bazujące na sulfonowanych żywicach naftalenowych lub lignosulfonianach. W przypadku tych pierwszych utrzymanie konsystencji mieszanki betonowej szczególnie w wysokich temperaturach nie jest możliwe dłużej niż 60 minut. W przypadku drugiej grupy obserwuje się wpływ na opóźnienia czasu wiązania i obniżenie tempa narastania wytrzymałości wczesnych. Lignosulfoniany są jednak doskonałym uzupełnieniem dla technologii polimerowych, wzmacniając efekt ich działania. W przypadku domieszek na bazie polimerów również można dostrzec różnice pomiędzy poszczególnymi generacjami/rodzajami superplastyfikatorów. Technologiami ukierunkowanymi na organicznie negatywnego wpływu polimerów na lepkość mieszanek betonowych są technologie bazujące na aromatycznych polimerach grzebieniowych nazywane też poliaryloeterami (polyarylethers PAE) oraz inteligentna technologia klastrowa (Intelligent Cluster System ICS). PAE jest specjalnie zaprojektowanym polimerem o

unikatowych właściwościach nadających mieszance niższą lepkość niż w przypadku klasycznych eterów polikarboksylowych, natomiast w przypadku ICS modyfikacja PCE odbywa się przy pomocy klastrów, które odpowiadają za poprawę reologii mieszanek i niższą lepkość [5, 6].

Do czynników wpływających na ciśnienie pompowania oraz wydajność tego procesu można zaliczyć średnicę i długość rurociągu, kierunek, a także temperaturę otoczenia i samej mieszanki betonowej [1, 3].

2. Cementy i materiały stosowane w badaniach

Z punktu widzenia inżynierii materiałowej, cementy niskoemisyjne oferują szereg korzyści technologicznych, a odpowiednio dobrane proporcje składników mogą istotnie wpływać na właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu. W związku z tym, badania nad właściwościami cementów niskoemisyjnych oraz ich wpływem na zachowanie się mieszanek betonowych – w tym reologię, pompowalność i trwałość – nabierają szczególnego znaczenia zarówno w środowisku naukowym, jak i w praktyce inżynierskiej.

Przedmiotem badań dla porównawczej oceny pompowalności były mieszanki betonowe przygotowane z cementu referencyjnego CEM I 42,5 R (tabela 1, mieszanka nr 1) oraz cementu o obniżonej emisyjności – CEM II B-M (S-LL) 42,5N (tabela 1, mieszanka nr 2). W tabeli 2 zestawiono dane emisyjne dla badanych cementów, wyrażone w kg CO₂/t cementu, określone jako potencjał globalnego ocieplenia (GWP – Global Warming Potential) w analizie cyklu życia (LCA), faza A1-A3. Cement CEM II/B-M (S-LL) 42,5N charakteryzuje się niższą o 20% emisyjnością, w porównaniu do CEM I 42,5R.

Tabela 1. Receptury mieszanek betonowych nr 1 i nr 2

Składniki	Mieszanka nr 1	Mieszanka nr 2
Rodzaj cementu	CEM I 42,5R	CEM II/B-M (S-LL) 42,5N
Ilość cementu [kg/m ³]	320	
Ilość wody [kg/m ³]	179	
Ilość kruszywa 0-2mm [kg/m ³]	755	
Ilość kruszywa 2-8 i 8-16mm [kg/m ³]	1025	
Rodzaj superplastyfikatora	MasterCO ₂ re 3250	
Ilość superplastyfikatora [kg/m ³]	3,20	2,56

Tabela 2. Emisyjność (GWP) cementów

Rodzaj cementu	GWP (kg CO ₂ -eq/t brutto)	GWP (kg CO ₂ -eq/t netto)
CEM I 42,5R	695	519
CEM II/B-M (S-LL) 42,5N	550	418

W odniesieniu do właściwości normowych badanych cementów nie zaobserwowano istotnych różnic, z wyjątkiem przewidywanej – wynikającej z deklarowanej klasy wytrzymałości – niższej wytrzymałości wczesnej cementu CEM II/B-M (S-LL) 42,5N (tabela 3). W kontekście pompowalności, warto zaznaczyć różnice w stopniu rozdrobnienia przedmiotowych cementów. Cement CEM II/B-M (S-LL) 42,5N charakteryzuje się bardziej rozwiniętą powierzchnią właściwą, a jednocześnie wartość charakterystyczna d₉₀, wskazuje na mniejszy stopień rozdrobnienia – tabela 3.

Ponadto, dla uzyskania założonej konsystencji mieszanek betonowych nr 1 i nr 2 (klasa S3 wg metody opadu stożka), konieczne było dozowanie domieszki upłynniającej. Mieszanka nr 2 z cementem niskoemisyjnym CEM II/B-M (S-LL) 42,5N wymagała mniejszego dozowania superplastyfikatora dla uzyskania założonego efektu upłynnienia (tabela 1).

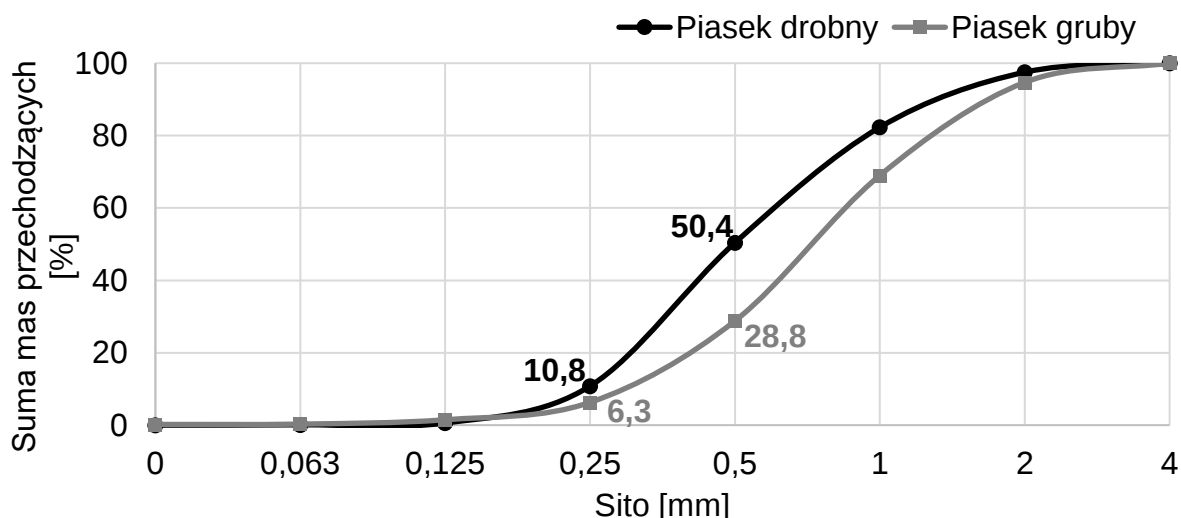
Tabela 3 Właściwości cementów

Właściwość	CEM I 42,5R	CEM II/B-M (S-LL) 42,5N
Wytrzymałość na ściskanie [MPa] 2 dni	27,2	18,3
Wytrzymałość na ściskanie [MPa] 28 dni	58,6	49,5
Początek czasu wiązania [min]	210	235
Gęstość [g/cm ³]	3,14	3,07
Stopień zmielenia wg Blaine [cm ² /g]	ok. 3900	ok. 4200
Pozostałość na sicie 32µm [%]	26,4	31,7
D ₉₀ [µm]	59,5	74,0

Pompowalność mieszanki betonowej uzależniona jest od zawartości frakcji drobnych, zarówno w części spoiwowej, jak i w stosie okruszowym kruszywa. Uznano zatem za istotne aby ocenić wpływ uziarnienia piasku na pompowalność mieszanki z cementem o obniżonej emisyjności CEM II/B-M (S-LL) 42,5N. W tym celu przygotowano mieszankę nr 3 (tabela 4) z piaskiem grubym, charakteryzującym się niższą zawartością ziaren <0,25mm i <0,5mm – rys. 3 w porównaniu do piasku drobnego stosowanego w mieszankach nr 1 i nr 2. Dodatkowo, dla celowego zubożenia mieszanki w frakcje drobne, w mieszankach nr 3 i nr 4 zaprojektowano niższą zawartość cementu, tj. 300kg/m³ (tabela 4). Pokreślić należy, że mieszanka nr 4 ma taki sam skład, jak mieszanka nr 3, różni się jedynie dodatkowym dozowaniem domieszki stabilizującej.

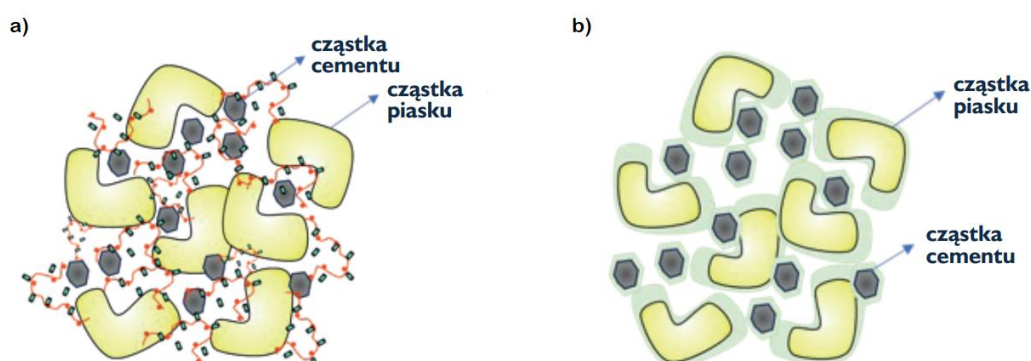
Tabela 4. Receptury mieszanek betonowych nr 3 i nr 4

Składniki	Mieszanka nr 3	Mieszanka nr 4
Rodzaj cementu	CEM II/B-M (S-LL) 42,5N	
Ilość cementu [kg/m ³]	300	
Ilość wody [kg/m ³]	165	
Ilość kruszywa 0-2mm (piasek gruby) [kg/m ³]	790	
Ilość kruszywa 2-8 i 8-16mm [kg/m ³]	1052	
Rodzaj superplastyfikatora	MasterCO ₂ re 3250	
Ilość superplastyfikatora [kg/m ³]	2,55	
Rodzaj domieszki stabilizującej	Nie stosowano	MasterMatrix LF600
Ilość domieszki stabilizującej [kg/m ³]		2,0



Rys. 3. Krzywe uziarnienia piasku dla mieszanek nr 1 i nr 2 (piasek drobny) oraz nr 3 i nr 4 (piasek gruby)

Dla poprawy spoistości mieszanki nr 4 zastosowano domieszkę stabilizującą, kompatybilną z superplastyfaktorem (tabela 4). Ta domieszka modyfikująca lepkość, ma na celu zwiększyć więźliwość wody w mieszance betonowej, dla zapewnienia pompowalności mieszanki, o niskiej zawartości frakcji drobnych. Domieszka działa w oparciu o dwa podstawowe mechanizmy, synergicznie połączone w celu zwiększenia wydajności - dynamicznie reguluje lepkość (rys. 4a) i zmniejsza tarcie międzycząsteczkowe, rozpraszając energię (rys. 4b). W efekcie mieszanka stabilizowana wykazuje niską lepkość podczas ruchu, przy jednoczesnym zachowaniu odporności na segregację w stanie nieruchomym [5, 6].



Rys. 4. Mechanizm działania domieszek stabilizujących [6]

3. Aparatura i metodyka badawcza

Dla pełnej oceny pompowalności metodami laboratoryjnymi, określono następujące właściwości mieszanek betonowych:

- konsystencja metodą opadu stożka wg PN-EN 12350-2:2019-07 [7]
- właściwości reologiczne wg instrukcji obsługi reometru ICAR Plus (rys. 5) [8]
- pompowalność wg instrukcji obsługi urządzenia Sliper (rys. 6) [9]

Właściwości reologiczne określono przy pomocy reometru ICAR Plus. Urządzenie to umożliwia przeprowadzenie cyklu badania, którego efektem jest wyznaczenie wg modelu Bingham granicy płynięcia [Pa] i lepkości plastycznej [Pa*s], w wyniku pomiaru momentu siły potrzebnego do obrotu mieszadła zanurzonego w mieszance betonowej z określoną prędkością. Dedykowany pojemnik o objętości 20dm³ wypełnia się mieszanką betonową, bez zagęszczania. Następnie do mieszanki w cylindrze pomiarowym wprowadza się reometr wyposażony w mieszadło, umieszczony w ramce, która zapewnia centryczne umiejscowienie mieszadła w badanej mieszance, dodatkowo stabilizując reometr w czasie pomiaru. Z poziomu oprogramowania, uruchamiany jest cykl pomiarowy, który kontroluje proces. Po ok. 60 sekundach oprogramowanie prezentuje wykres zależności: moment siły / prędkość obrotowa oraz wyznaczone z równania regresji dla krzywej pomiarowej wartości granicy płynięcia [Pa] i lepkości plastycznej [Pa*s]. Z użytkowego punktu widzenia ważne jest to, że pomiar można wykonać nie tylko w warunkach laboratoryjnych, ale również na wytwórni betonu lub w zakładzie prefabrykacji.



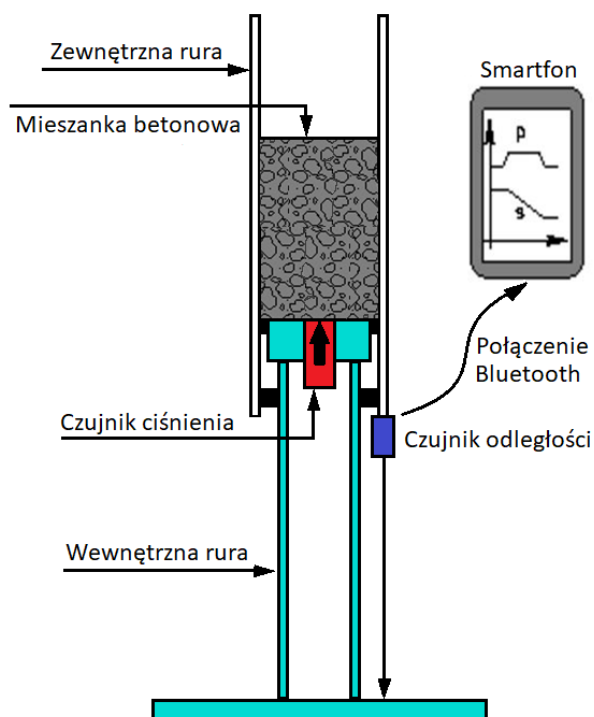
Rys. 5. Reometr ICAR Plus [8]

Pompowalność mieszanek określona została podczas testu wykonanego przy pomocy urządzenia Sliper, opracowanego we współpracy firm Schleibinger i Putzmeister. Urządzenie (rys. 6) składa się z dwóch rur umieszczonych centrycznie, jedna w drugiej. Wewnętrzna, nieruchoma rura, zakończona jest czujnikiem ciśnienia umiejscowionym na jej górnej części. Czujnik rejestruje nacisk (parcie) wywierane przez mieszankę betonową umieszczoną w rurze zewnętrznej. Dodatkowo, urządzenie wyposażone jest w detektor odległości, pozwalający na pomiar prędkości opadania rury zewnętrznej w trakcie testu. Badanie polega na tym, że po wypełnieniu niezagęszczoną mieszanką betonową, zewnętrznej rury, zablokowanej w pozycji podniesionej, zwalniana jest blokada, w efekcie rura zewnętrzna swobodnie opada. W tym czasie następuje pomiar wywieranego ciśnienia przez mieszankę oraz prędkości opadania rury. Po wykonaniu trzech powtórzeń bez obciążenia, nakłada się dodatkowe obciążniki na zewnętrzną rurę, aby zwiększyć prędkość jej opadania. Dla zwiększenia

rozdzielczości pomiaru, zalecane jest wykonanie co najmniej trzech pomiarów przy minimum pięciu poziomach obciążenia (poprzez dokładne kolejnych obciążników). Wyniki poszczególnych pomiarów są rejestrowane w dedykowanej aplikacji zainstalowanej w smartfonie połączonym bezprzewodowo z urządzeniem.

Urządzenie Sliper daje możliwość wykonania badań w praktycznie każdych warunkach, zarówno laboratoryjnych, jak i na budowie. Na podstawie przeprowadzonego testu można uzyskać następujące informacje:

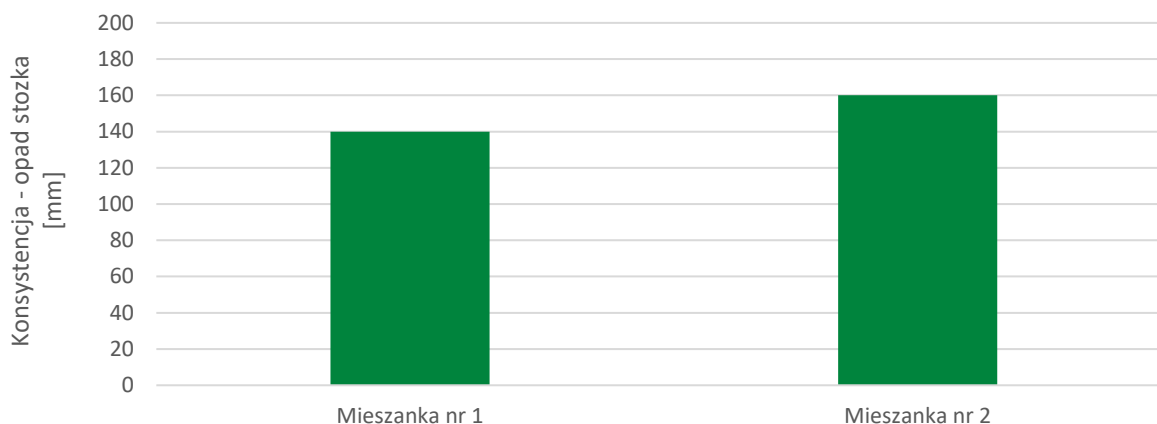
- Czy mieszanka jest pompowalna.
Jeśli możliwe było przeprowadzenie testu oznacza to, że mieszanka jest pompowalna. Gdyby była na granicy stabilności (zbyt duży bleeding, oznaki segregacji) nastąpi wyciek wody (zaczynu) na styku rur (zewnętrznej i wewnętrznej), a wypłukane z zaczynem najdrobniejsze ziarna kruszywa zablokują opadanie zewnętrznej rury w trakcie pomiaru. Natomiast przy mieszance o zbyt gęstej konsystencji i dużej lepkości opadanie zewnętrznej rury nie będzie możliwe.
- Jakie ciśnienie początkowe jest potrzebne, aby mieszankę wprowadzić w ruch.
Wartość ciśnienia początkowego koreluje z granicą płynięcia oraz konsystencją mierzoną metodą opadu stożka.
- Jakie ciśnienie robocze jest potrzebne aby mieszankę utrzymać w ruchu.
Wartość ciśnienia roboczego jest funkcją lepkości plastycznej mieszanki, wyznaczonej w pomiarach reometrycznych
- Prognozę pompowalności określoną miarą ciśnienia roboczego, przy którym możliwe jest pompowanie mieszanki przez rurę o określonej średnicy na zadaną odległość lub wysokość przy określonej wydajności podawania.



Rys. 6. Schemat budowy urządzenia Sliper [9]

4. Omówienie wyników badań

Badania właściwości mieszanek (konsystencja, reologia, pompowalność) powtórzono trzykrotnie, każdorazowo przygotowując nową mieszankę wg ustalonej receptury (tabela 1). W pierwszym kroku, porównano właściwości mieszanek nr 1 i nr 2. Pod względem konsystencji badanej metodą opadu stożka [7] stwierdzono, że mieszanki są do siebie zbliżone, można zaklasyfikować je do tej samej klasy konsystencji S3. Uśrednione wyniki z trzech serii pomiarów przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Konsystencja mieszanek badana metodą opadu stożka

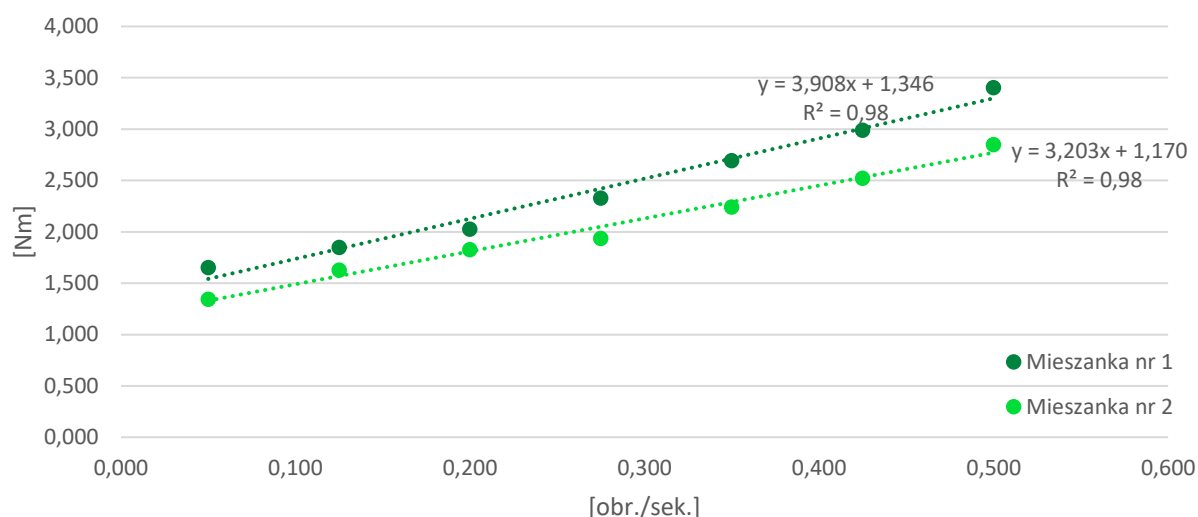
Po zbadaniu konsystencji wykonano pomiary reometrem ICAR Plus w celu określenia granicy płynięcia i lepkości plastycznej (tabela 5).

Tabela 5. Właściwości reologiczne mieszanek nr 1 i nr 2

Właściwość	Mieszanka nr 1		
	Seria nr 1	Seria nr 2	Seria nr 3
Granica płynięcia [Pa]	266,8	231,0	255,0
Średnia granica płynięcia [Pa]	250,9		
Lepkość plastyczna [Pa*s]	62,4	74,8	71,6
Średnia lepkość plastyczna [Pa*s]	69,6		
Właściwość	Mieszanka nr 2		
	Seria nr 1	Seria nr 2	Seria nr 3
Granica płynięcia [Pa]	206,8	238,4	223,0
Średnia granica płynięcia [Pa]	222,7		
Lepkość plastyczna [Pa*s]	61,7	55,4	52,9
Średnia lepkość plastyczna [Pa*s]	56,7		

Wyznaczone właściwości reologiczne pozwalają stwierdzić, że mieszanka nr 2 (CEM II/B-M (S-LL) 42,5N) wykazuje mniejszą granicę płynięcia, co koresponduje z minimalnie większym opadem stożka zmierzonym przy badaniu konsystencji. Zaobserwowano również, że mieszanka nr 2 charakteryzuje się mniejszą lepkością plastyczną (o około 20%), w odniesieniu do mieszanki nr 1, co pozwala sądzić, że do jej transportu i zabudowy będzie potrzebne mniejsze ciśnienie pompy i/lub krótszy czas pracy.

Na rys. 8 przedstawiono uśrednione wyniki oznaczenia właściwości reologicznych mieszanek betonowych uzyskane w reometrze ICAR. Kąt nachylenia linii trendu (współczynnik kierunkowy prostej), na podstawie którego wyliczana jest lepkość plastyczna, dla mieszanki nr 2 jest mniejszy.



Rys. 8. Właściwości reologiczne mieszanek oznaczone reometrem ICar Plus

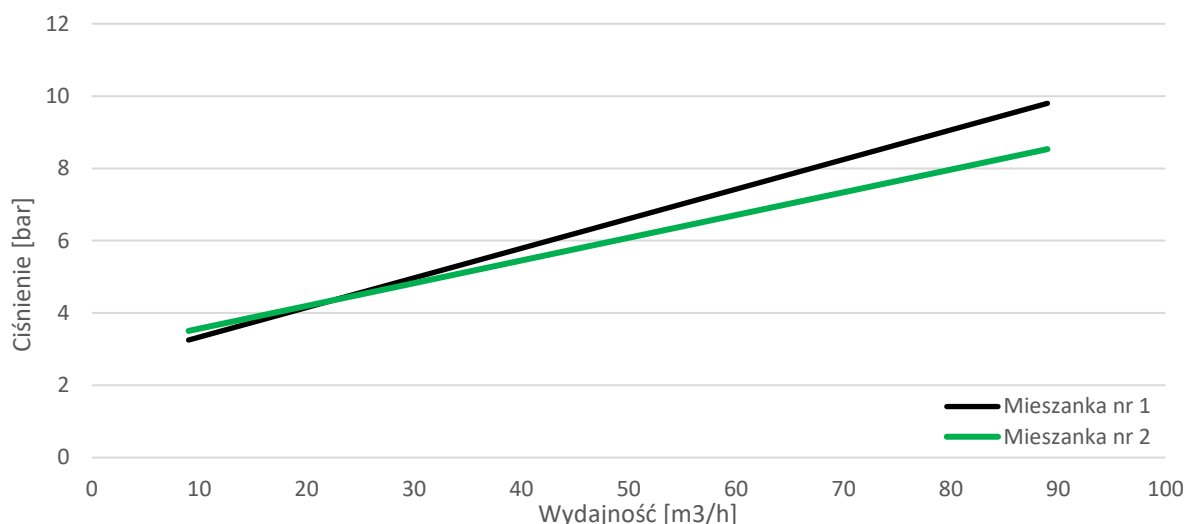
Podczas pomiaru pompowalności mieszanek (mieszanka nr 1 i nr 2, dla każdej 3 serie pomiarowe) przeprowadzono trzykrotne powtórzenie przy 5 różnych obciążeniach co daje w sumie 45 punktów pomiarowych dla każdej mieszanki. Następnie, na podstawie pomiarów, przeprowadzono symulację ciśnienia potrzebnego do pompowania mieszanki przy wydajności w zakresie od 9 do 89 m³/h, zadając warunki brzegowe - średnica rury 126mm, długość rurociągu 50m. W tabeli 6 przedstawiono wyniki symulacji dla mieszanek nr 1 i 2 przy trzech seriach pomiarowych. W celu porównania pompowalności mieszanek wyliczono wartość średnią, a zależność przedstawiono na rys. 9.

Tabela 6. Symulacja pompowalności mieszanek betonowych przy założonej długości i średnicy rurociągu

Wydajność [m³/h]	Ciśnienie [bar]		
	Mieszanka nr 1		
	Seria nr 1	Seria nr 2	Seria nr 3
9	3,57	3,71	2,47
89	8,66	10,17	10,57
Wydajność [m³/h]	Mieszanka nr 2		
	Seria nr 1	Seria nr 2	Seria nr 3
	Seria nr 1	Seria nr 2	Seria nr 3
9	3,51	3,22	3,78
89	8,84	9,22	7,53

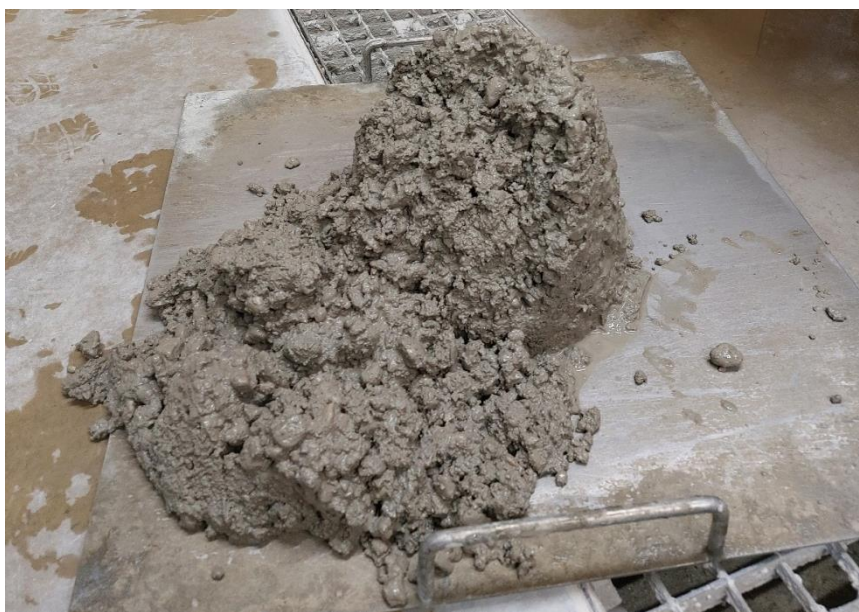
Wyniki przeprowadzonej symulacji w oparciu o pomiary podczas testu pompowalności na urządzeniu Sliper wykazały, że mieszanka nr 2 (CEM II/B-M (S-LL) 42,4N) przy wzrastającej wydajności pompowania wymaga mniejszego ciśnienia tłoczenia w

porównaniu do mieszanki nr 1 (CEM I 42,5R). Wyniki tego testu są zbieżne z badaniami właściwości reologicznych mieszanek, które wykazały, że przy zbliżonej konsystencji mieszanka nr 2 charakteryzowała się mniejszą lepkością plastyczną w porównaniu do mieszanki nr 1.



Rys. 9. Symulacja pompowalności mieszanek betonowych, przy założonej długości i średnicy rurociągu.

W kolejnym kroku, przygotowano mieszankę nr 3, zawierającą piasek gruby (tabela 4, rys. 3). Podczas badania konsystencji metodą opadu stożka [7], problemem okazało się miarodajne przeprowadzenie testu (uzyskanie właściwej postaci/charakterystyki opadu stożka). Po podniesieniu stożka stwierdzono, że ocena konsystencji tą metodą jest niemożliwa, mieszanka nie była wystarczająco spoista, stożek był ścięty i zauważono oznaki bleedingu (rys. 10).



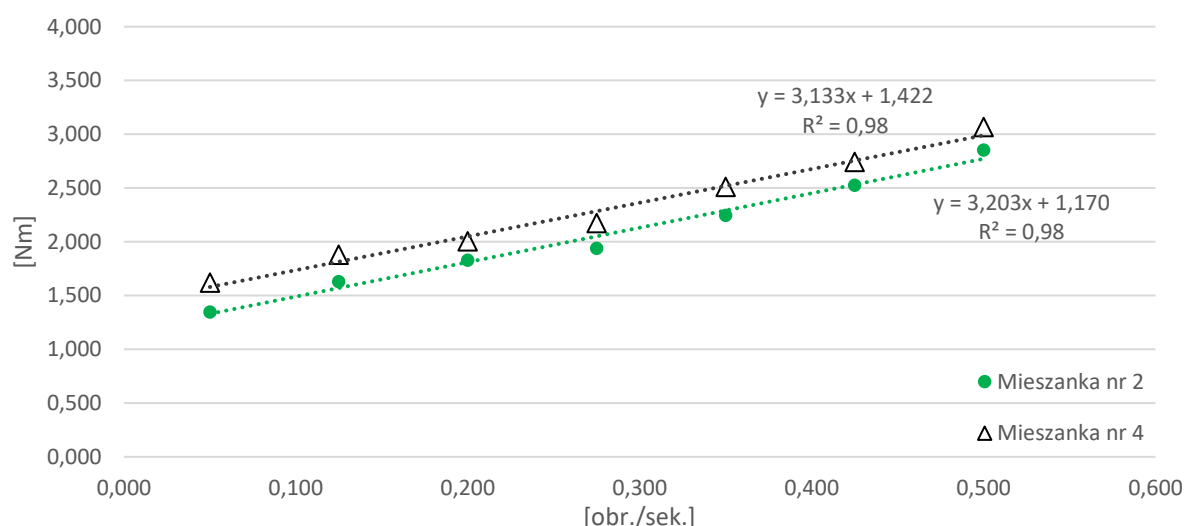
Rys. 10. Oznaczenie konsystencji mieszanki nr 3 metodą opadu stożka

Ponieważ pomiar konsystencji mieszanki nr 3 nie był miarodajny, odstąpiono od wykonywania dalszych pomiarów, tj. badań właściwości reologicznych (wg instrukcji producenta opad stożka mieszanki powinien wynosić co najmniej 70 mm) i badania pompowalności (mieszanka powinna być stabilna).

W następnym kroku do przygotowanej mieszanki, dodano domieszkę stabilizującą MasterMatrix LF 600 (mieszanka nr 4, tabela 4), dla której powtórzono badanie konsystencji metodą opadu stożka, głównie dla oceny poprawy spoiistości mieszanki. Pomiar konsystencji dla tej mieszanki wykazał prawidłowy opad stożka, odczyt na poziomie 90 mm. Mieszankę nr 4 zaklasyfikowano do dalszych pomiarów reologicznych. Wyniki badań uzyskane z pomiaru w reometrze ICAR przedstawiono w tabeli 7 oraz na rys. 11. Jako odniesienie porównawcze przyjęto mieszankę nr 2.

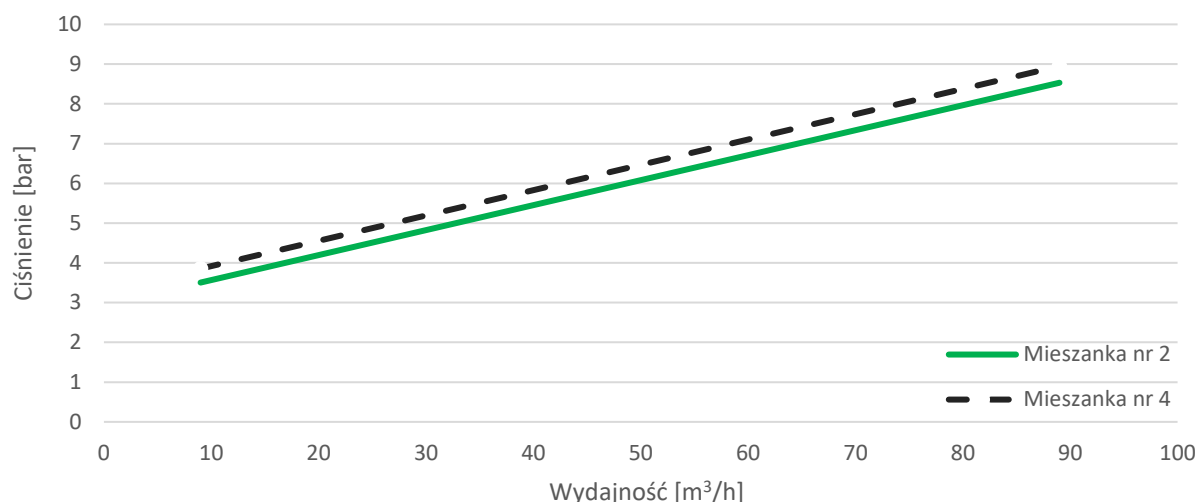
Tabela 7. Właściwości reologiczne mieszanki nr 4 w odniesieniu do mieszanki nr 2.

Właściwość	Mieszanka nr 2	Mieszanka nr 4
Średnia granica płynięcia [Pa]	222,7	287,1
Średnia lepkość plastyczna [Pa*s]	56,7	49,0



Rys. 11. Właściwości reologiczne mieszanki nr 4 w odniesieniu do mieszanki nr 2

Badania właściwości reologicznych wykazały, że wyższa wartość granicy płynięcia mieszanki nr 4 w odniesieniu do mieszanki nr 2 koresponduje z wynikami badań konsystencji metodą opadu stożka (90mm vs. 140mm). Stwierdzono również, że mieszanka nr 4 charakteryzuje się mniejszą lepkością, co z kolei zwiększa ryzyko utraty spoiistości, w konsekwencji może uniemożliwić pompowanie. W trakcie wykonywania badania reometrem stwierdzono, że mieszanka nr 4 nie wykazuje oznak bleedingu, przystąpiono zatem do oceny pompowalności (wyniki symulacji na rys. 12).



Rys. 12. Symulacja pompowalności mieszanki nr 4 w porównaniu do mieszanki nr 2

Badanie urządzeniem Sliper wykazało, że po modyfikacji domieszką MasterMatrix LF600, możliwe jest uzyskanie stabilnej mieszanki, nawet jeżeli zastosowano piasek o nieoptymalnym uziarnieniu (niska zawartość frakcji < 0,5mm), przy dodatkowo obniżonej zawartości cementu (-20kg/m³). Niemniej jednak, tak zaprojektowana mieszanka będzie wymagała większego ciśnienia pompowania, w porównaniu do mieszanki o lepszym doszczelnieniu stosu okruszowego (piasek o większej ilości drobnej frakcji) oraz większej zawartości cementu.

5. Wnioski

Podsumowując opisane rezultaty przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

- mieszanka betonowa z cementem portlandzkim wieloskładnikowym CEM II/B-M (S-LL) 42,5N charakteryzuje się zbliżoną konsystencją do mieszanki z cementem portlandzkim CEM I 42,5R, przy mniejszym dozowaniu domieszki upłynniającej,
- przy zbliżonej konsystencji i granicy płynięcia mieszanka betonowa z cementem portlandzkim wieloskładnikowym CEM II/B-M (S-LL) 42,5N wykazuje mniejszą lepkość plastyczną,
- różnica w lepkości mieszanek powoduje, że podczas transportu betonu pompą mieszanekę z cementem portlandzkim wieloskładnikowym CEM II/B-M (S-LL) 42,5N można podawać z mniejszym ciśnieniem roboczym, przy zachowaniu stałej wydajności pompowania,
- dla mieszanki niespoistej, na granicy segregacji, z uwagi na niską zawartość frakcji drobnych w piasku i mniejszą zawartość cementu, możliwa jest poprawa jej jednorodności i uzyskanie właściwości reologicznych umożliwiających podawanie pompą w wyniku modyfikacji odpowiednią, kompatybilną domieszką stabilizującą.

6. Literatura

- [1] Beton – technologie i metody badań, praca zbiorowa, redakcja naukowa prof. Jan Deja, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2020
- [2] Mikhalev, D.; Fakhrayee Nejad, S.; Ng, S.; Bose, B.; De Schryver, R.; Brunčič, A.; Mohan, M. K.; Wang, Y.; Rahul, A.; Rehman, A. U.; Jiao, D.; Mechtcherine, V.; De

Schutter, G.; Feys, D. Practical Insights and Advances in Concrete Pumping. RILEM Tech Lett 2024, 9, 1-9

[3] Feys D., De Schutter G., Fataei S., . Martys S. N., Mechtcherine V., Pumping of concrete: Understanding a common placement method with lots of challenges, Cement and Concrete Research, Vol. 154, 2022,106720,

[4] Vademecum Technologia Betonu, A2, Kruszywa w składzie betonu, www.heidelbergmaterials.pl/pl/vademecum-technologia-betonu

[5] Gruba L., Zapała M., MasterMatrix LF 600 na oczekiwania rynku i wyzwania przyszłości, BTA 3(107)/2024, 46-47

[6] www.master-builders-solutions.com/pl-pl/produkty/mastermatrix/mastermatrix-lf-600/, data dostępu 26.05.2025

[7] PN-EN 12350-2:2019-07 Badania mieszanki betonowej -- Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka

[8] [Concrete Rheometer - ICAR Plus - Germann Instruments](#), data dostępu 26.05.2025

[9] [Schleibinger Testing Systems - SLIPER Determining the Pumping Capacity of Concrete](#), data dostępu 26.05.2025