

XIII  
KONFERENCJA

# 2025 DNI BETONU

TRADYCJA I NOWOCZESNOŚĆ

13-15 października 2025

## MONOGRAFIE TECHNOLOGII BETONU - REFERATY



[dnibetonu.com](http://dnibetonu.com)

Redakcja: **Jan Deja**  
**Bartosz Głowacz**  
**Paulina Gos-Błaszczyk**  
**Patryk Jóźwiak**  
**Dariusz Konieczny**  
**Grzegorz Krechowiecki**  
**Zbigniew Pilch**  
**Bożena Środa**  
**Zespół SPC**

Skład i łamanie tekstu,  
opracowanie graficzne: **AD-LINE.PL**

Projekt: **Artur Darlak**

© Copyright by Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2025

ISBN: 978-83-61331-51-3

Wydawca:  **Stowarzyszenie Producentów Cementu**  
ul. Lubelska 29, 30-003 Kraków  
tel. +48 12 423-33-55  
e-mail: [wydawnictwo@polskicement.pl](mailto:wydawnictwo@polskicement.pl)  
[www.polskicement.pl](http://www.polskicement.pl)

**XIII**  
KONFERENCJA

2025.

# DNI BETONU

T R A D Y C J A I N O W O C Z E S N O Ś Ć

13-15 października 2025

**MONOGRAFIE  
TECHNOLOGII  
BETONU**

**- REFERATY**



[dnibetonu.com](https://dnibetonu.com)

---

# WŁAŚCIWOŚCI MIESZANKI BETONOWEJ

PROPERTIES OF CONCRETE MIX

**Dr inż. Szymon Skibicki<sup>1</sup>**

**Dr hab. inż. Adam Zieliński, prof. ZUT<sup>1</sup>**

**Richard Dvořák, Ph.D.<sup>2</sup>**

**doc. Libor Topolář, Ph.D.<sup>2</sup>**

**Prof. dr hab. inż. Maria Kaszyńska<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Polska

<sup>2</sup> Uniwersytet Technologiczny w Brnie, Czechy

## **Wpływ makrowłókien poliolefinowych i topologii wydruku na podstawowe parametry mechaniczne kompozytów na spoiwie cementowym w technologii druku 3D**

Impact of Polyolefin Fibers and Print Topologies on the Basic Mechanical Properties of Cement-Based Composites in 3D Printing Technology

### **Streszczenie**

W artykule skupiono się na dwóch zagadnieniach związanych z technologią wytwarzania kompozytów cementowych metodą przyrostową. Oceniono wpływ krótkich makrowłókien poliolefinowych o długości 24 mm oraz topologii wydruku na wybrane parametry kompozytu na spoiwie cementowym przeznaczonym do druku 3D. W ramach badań wykonano próbki o wysokości od jednej do dwóch warstw, w dwóch topologiach: liniowej (wielowarstwowe próbki drukowane warstwa po warstwie) oraz z przesunięciem warstw (próbki drukowane w taki sposób, że następowało przesunięcie połączenia kolejnych warstw na ich szerokości). W obu przypadkach zastosowano mieszankę referencyjną oraz mieszankę zawierającą włókna poliolefinowe. W artykule przeanalizowano wytrzymałość na ściskanie niestwardniałego kompozytu (tzw. green strength), skurcz liniowych próbek drukowanych, wytrzymałość na zginanie i ściskanie stwardniałych próbek drukowanych w różnych topologiach. Badania potwierdziły, że istnieje wpływ topologii wydruku na parametry mechaniczne betonu drukowanego. Ponadto wykazano, że struktura próbki z przesunięciem warstw mimo bardziej złożonej topologii nie wykazuje istotnych różnic wytrzymałościowych względem próbek o topologii liniowej. Ponadto stwierdzono, że dodatek krótkich włókien poliolefinowych ogranicza skurcz kompozytu cementowego w teście deformacji warstwy liniowej. Udział włókien

zwiększył wytrzymałość na zginanie stwardniałego kompozytu maksymalnie o około 17%, uzyskano również statystycznie istotną poprawę wytrzymałości niestwardniałego kompozytu zawierającego zastosowane włókna. Podsumowując w artykule przedstawiono badania wstępne dotyczące zastosowania włókien poliolefinowych w technologii druku 3D kompozytów cementowych. Ponadto łącznie z zastosowaniem włókien przeanalizowano ich skuteczność w zależności od przyjętej topologii wydruku.

## Abstract

The article focuses on two issues related to the incremental production of cement composites: the impact of short polyolefin macrofibers (24 mm in length) and the influence of print topology on selected properties of cement-based composites designed for 3D printing. As part of the study, samples with a height of one or two layers were produced in two topologies: (i) linear (multilayer samples printed layer by layer), and (ii) shifted (samples printed so that the joints between subsequent layers were offset along their width). In both cases, a reference mixture and a mixture containing polyolefin fibers were tested. The article examines compressive strength of the fresh composite (so-called green strength), shrinkage of linear printed samples, as well as flexural and compressive strength of hardened samples in different topologies. The results confirmed that print topology affects the mechanical properties of printed concrete. Moreover, it was shown that samples with shifted layers, despite their more complex geometry, do not exhibit significant strength differences compared to samples with linear topology. In addition, the incorporation of short polyolefin fibers reduced shrinkage in linear layers. The fiber-reinforced mixtures showed an increase in flexural strength of the hardened composite (up to approximately 17%) and a statistically significant improvement in the green strength. In summary, the article presents preliminary research on the use of polyolefin fibers in 3D printing of cement composites and highlights the relationship between fiber effectiveness and the adopted print topology.

## 1. Wprowadzenie

Współczesne budownictwo dynamicznie rozwija się w kierunku stosowania innowacyjnych materiałów i technologii, które coraz częściej wpisują się w koncepcję zrównoważonego rozwoju [1,2]. W ostatnich latach istotną rolę w tym procesie odgrywają rozwiązania oparte na modelowaniu predykcyjnym [3] oraz technologiach przyrostowych, w tym druku 3D z betonu [4]. Szczególnie ta ostatnia technika znajduje coraz szersze zastosowanie, ponieważ oferuje możliwość usprawnienia procesu budowlanego w wielu aspektach – od ograniczenia zużycia materiałów, przez skrócenie czasu realizacji, aż po swobodę kształtowania geometrii elementów. Jednocześnie kluczowym zagadnieniem pozostaje ocena właściwości stwardniałych kompozytów przeznaczonych do tego rodzaju druku, co stanowi wyzwanie badawcze i inżynierskie.

Analiza mechanicznych właściwości betonów drukowanych jest złożona ze względu na specyfikę procesu technologicznego. Istotnym utrudnieniem jest anizotropia materiału [5–7], czyli zależność właściwości od kierunku obciążenia, a

także silny wpływ czynników technologicznych i materiałowych, takich jak skład mieszanki, liczba nakładanych warstw, czas odstępu między ich ułożeniem czy rodzaj stosowanych dodatków i domieszek. Literatura przedmiotu dostarcza licznych przykładów badań, które pokazują, że uzyskiwane wyniki mogą znacząco się różnić, a w wielu przypadkach rozbieżności są na tyle duże, że utrudniają jednoznaczną interpretację.

Jednym z istotnych czynników wpływających na właściwości stwardniałego kompozytu jest liczba warstw nakładanych podczas procesu drukowania. Badania Shakora i in. [8] wykazały, że w przypadku zapraw cementowo-piaskowych, zarówno bez włókien, jak i z włóknami szklanymi, wytrzymałość na ściskanie malała wraz ze wzrostem liczby warstw, choć różnice nie były statystycznie istotne. Podobne obserwacje poczynili Skibicki i in. [9], którzy, stosując wysokowartościową zaprawę z dodatkami mineralnymi, zaobserwowali spadek wytrzymałości na ściskanie od 75,42 MPa przy sześciu warstwach do 60,18 MPa przy dwudziestu warstwach, podczas gdy próbka normowa osiągnęła 85,72 MPa. Wskazuje to, że liczba warstw ma potencjalnie istotny wpływ na właściwości mechaniczne, choć jego zakres może zależeć od jakości i składu mieszanki.

Kolejnym istotnym zagadnieniem jest wpływ kierunku obciążenia na wytrzymałość próbek. Badania Le i in. [10] pokazały, że różnice w wytrzymałości na ściskanie w zależności od kierunku obciążenia były stosunkowo niewielkie, natomiast w przypadku badań wytrzymałości na zginanie kierunek ten odgrywał znaczącą rolę – próbki obciążane w kierunku podłużnym były nawet o połowę słabsze od próbek normowych. Z kolei wyniki Liu i in. [11] wskazały na zróżnicowanie wytrzymałości w zależności od orientacji próbki, przy czym najwyższe wartości uzyskano w kierunku podłużnym. Badania Wolfs i in. [12] oraz Rahul i in. [13] potwierdziły, że w wielu przypadkach różnice w wytrzymałości na zginanie są bardziej wyraźne niż w przypadku wytrzymałości na ściskanie, a próbki drukowane często osiągają niższe parametry niż próbki wykonywane metodami tradycyjnymi. Jednocześnie literatura podaje przykłady, gdzie w określonych warunkach próbki drukowane mogą przewyższać właściwości normowe [14].

Na szczególną uwagę zasługuje również zagadnienie adhezji międzywarstwowej. Jakość połączenia pomiędzy kolejnymi warstwami wprost wpływa na parametry mechaniczne elementów drukowanych, a czynnikiem kluczowym jest tutaj czas odstępu pomiędzy nakładaniem kolejnych warstw [15]. Niedostateczna przyczepność może prowadzić do powstawania osłabionych stref, które stają się potencjalnymi miejscami inicjacji zarysowań i pęknięć. Problem ten nabiera znaczenia zwłaszcza w przypadku elementów poddawanych obciążeniom zginającym, gdzie lokalizacja strefy pękania nie została dotychczas dostatecznie dobrze rozpoznana.

Podsumowując, dotychczasowe badania dowodzą, że parametry mechaniczne kompozytów cementowych wytwarzanych techniką druku 3D zależą od czynników technologicznych i materiałowych, przy czym szczególnie istotne okazują się: liczba warstw, kierunek obciążenia oraz jakość adhezji międzywarstwowej. Jednocześnie literatura wskazuje na dużą zmienność wyników – w niektórych przypadkach próbki drukowane osiągają wytrzymałość porównywalną lub wyższą od próbek normowych, w innych zaś nawet o kilkadziesiąt procent niższą. Brak spójności wyników uzasadnia konieczność prowadzenia dalszych badań, które pozwolą lepiej zrozumieć mechanizmy odpowiedzialne za zachowanie kompozytów cementowych wytwarzanych metodą przyrostową.

Celem niniejszej pracy jest analiza wpływu strategii wydruku oraz zastosowania krótkich włókien poliolefinowych na podstawowe parametry mechaniczne kompozytu cementowego. Badania przeprowadzone w ramach artykułu potwierdzają, że sposób realizacji procesu drukowania może istotnie wpływać na właściwości stwardniałego kompozytu. Jednocześnie wykazano, że włókna poliolefinowe, choć nie oddziałują w sposób istotny na parametry mechaniczne w stanie stwardniałym, mają znaczenie w przypadku właściwości materiału świeżego, wpływając m.in. na skurcz oraz proces układania warstwowego.

## 2. Materiały oraz procedura badawcza

### 2.1 Skład mieszanki użytej do badań

Na podstawie wcześniejszych badań do druku 3D zastosowano mieszankę B800 [6]. Mieszanka ta charakteryzuje się stałym współczynnikiem wodno-cementowym równym 0.3. Sumaryczna ilość spoiwa w mieszance jest równa 800 kg /m<sup>3</sup>, w tym 70% cementu CEM I 52,5R, 20% popiołu lotnego oraz 10 % pyłu krzemionkowego. Przebadano dwa podstawowe typy mieszanek: mieszanka z włóknami ASTRA polyexmesh o długości 24 mm (oznaczana jako „F”) oraz mieszanka bez włókien (oznaczona jako „O”). Zastosowano kruszywo naturalne w postaci piasku do 2 mm. Skład chemiczny zastosowanego cementu, popiołu lotnego i pyłu krzemionkowego przedstawiono w Tabl. 1.

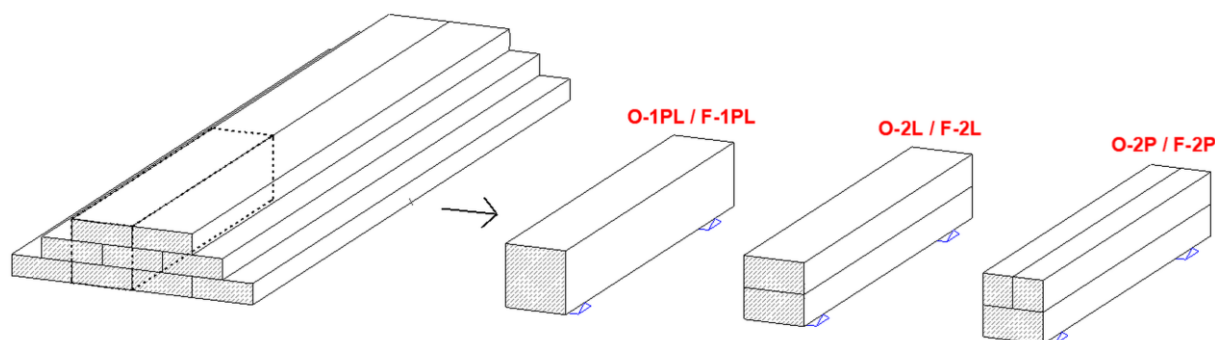
**Tabl. 1.** Skład chemiczny zastosowanego cementu, popiołu lotnego i pyłu krzemionkowego

| Skład chemiczny,%              | CEM I 52.5 R | Popiół lotny<br>krzemionkowy | Pył<br>krzemionkowy |
|--------------------------------|--------------|------------------------------|---------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 19.70        | 54.00                        | 94.00               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.93         | 28.40                        | –                   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.54         | 7.30                         | –                   |
| CaO                            | 64.23        | 3.10                         | 0.30                |
| CaCO <sub>3</sub>              | –            | –                            | –                   |
| MgO                            | 1.32         | 2.40                         | –                   |
| SO <sub>3</sub>                | 2.91         | 0.40                         | 1.90                |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.12         | 1.10                         | –                   |
| K <sub>2</sub> O               | 0.76         | 2.90                         | –                   |
|                                | 0.07         | 0.01                         | 0.10                |
| H <sub>2</sub> O               | –            | –                            | 0.70                |
| Na <sub>2</sub> Oeq            | 0.63         | –                            | –                   |
| LOI                            | –            | –                            | 3.00                |

### 2.2 Metodologia badawcza – proces druku 3D oraz typy próbek

Wykonano próbki metodą druku 3D poprzez wytłaczanie. Do druku wykorzystano robota kartezjańskiego posiadającego 3 stopnie swobody zespolonego z pompą do betonu wyposażoną w specjalną głowicę drukującą. Proces wydruku i jego strategia były zaprojektowane przez autorów niniejszej pracy a następnie napisane za pomocą tzw. G-Code (urządzenie drukujące jest sterowane bezpośrednio za pomocą G-codu).

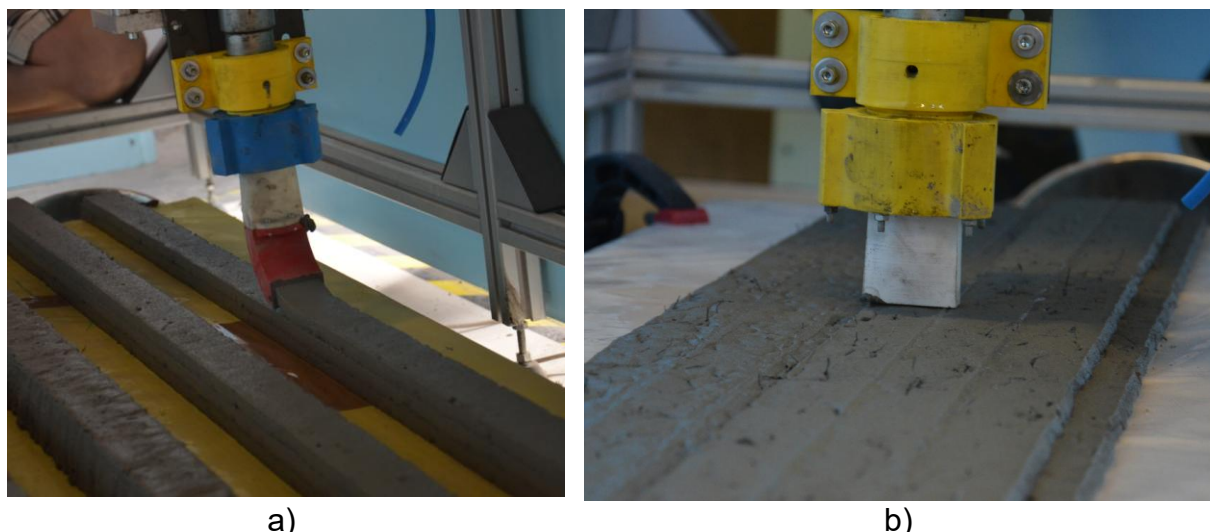
W ramach prac badawczych wykonano dwie główne topologie wydruku: próbki liniowe (L), próbki z przesuniętą warstwą (P). W przypadku próbek liniowych dokonano wielowarstwowego wydruku warstwa po warstwie – Rys. 1 W przypadku próbek z przesuniętą warstwą (P), druk został zaprojektowany tak by stworzyć przewiązanie między warstwami (próbki O-2P, F-2P – Rys. 1). Zestawienie wykonanych próbek przedstawiono w Tabl. 2. Próbkę podczas wydruku pokazano na Rys. 2.



**Rys. 1.** Topologia próbek wykonanych w ramach prac przedstawionych w pracy.

**Tabl. 2.** Zestawienie wykonanych próbek do badań

| Nazwa próbki | Opis                                                                                             | Czy mieszanka zawierała włókna ASTRA polyexmesh o długości 24 mm |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| REF          | Próbki referencyjne formowane normowo                                                            | NIE                                                              |
| FIB          |                                                                                                  | TAK                                                              |
| O-1PL        | Próbki drukowane liniowe                                                                         | NIE                                                              |
| F-1PL        |                                                                                                  | TAK                                                              |
| O-2L         | Próbki drukowane liniowe                                                                         | NIE                                                              |
| F-2L         |                                                                                                  | TAK                                                              |
| O-2P         | Próbki drukowane o strukturze uwzględniającej przesunięciem warstw względem siebie – por. Rys. 1 | NIE                                                              |
| F-2P         |                                                                                                  | TAK                                                              |

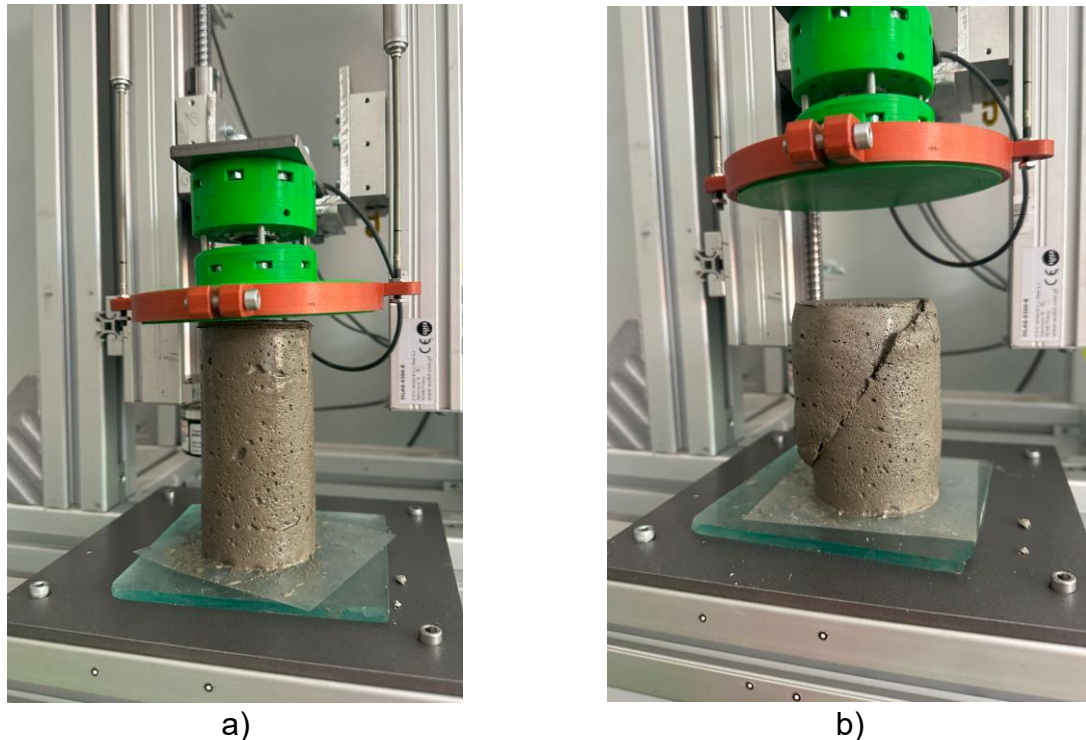


**Rys. 2.** Wydruk próbek do badań: a) próbki liniowe; b) próbki z przesunięciem warstwa i włóknami.

## 2.3 Metodologia badawcza – zakres badań

### 2.3.1 Badania wytrzymałości niestwardniałej mieszanki betonowej – green strength i green Young Modulus

Wykonania badania wytrzymałości na ściskanie niestwardniałej mieszanki betonowej na próbkach walcowych o średnicy 60 mm i wysokości 120 mm. W tym celu wykonano badania na ściskania z możliwością rozszerzalności bocznej (ang. UUCT - uniaxial unconfined compressive test), opis podobnych badań znajduje się też w polskiej literaturze (np. w celu charakterystyki gruntu – por. [16]). Badania tego typu są powszechnie stosowane do oceny wytrzymałości świeżej mieszanki betonowej stosowanej do druku 3D kompozytów cementowych (por. [17,18]). W niniejszej pracy badawczej wykonano badania po czasie 30 i 60 minut od dolania wody do suchych składników. Badanie było prowadzone na autorskim stanowisku pomiarowym wykonanych w ramach projektu [19]. Badania wykonano przy przesuwie tłoka o wartości 15 mm / minutę i kontroli przemieszczeń za pomocą czujników LVDT, szczegółowy opis stanowiska znajduje się w pracach [17,19]. Wyniki badań przedstawiono w punkcie 3 opracowania. Przykłady próbek przed badaniem i po badaniu pokazano na Rys. 3.



**Rys. 3.** Badanie green strength i green Young Modulus: a) próbka przed badaniem; b) próbka pobadaniu.

### 2.3.2 Badanie skurczu liniowego elementów drukowanych

Badania wczesnych odkształceń skurczowych przeprowadzono metodą dylatometryczną, wykorzystując próbki liniowe w dwóch wariantach: 1) próbki uformowane poprzez wytłaczanie pojedynczych warstw materiału z maszyny przyrostowej, bez dodatkowych zabiegów zagęszczania, 2) próbki zaformowane w półokrągłych korytkach liniowych i zagęszczone z wykorzystaniem stolika wibracyjnego, Rys. 4. Geometria próbek w obu wariantach była zbliżona: wysokość  $20 \pm 5$  mm, szerokość  $40 \pm 5$  mm. Różnice dotyczyły długości oraz powierzchni wysychania – w wariantcie 1 próbka miała długość 135 cm i wysychała zarówno z powierzchni górnej, jak i bocznych, natomiast w wariantcie 2 długość próbki wynosiła 100 cm, a wysychanie następowało wyłącznie z powierzchni górnej. Stosunek objętości do powierzchni wysychania wynosił odpowiednio  $V/S = 1,0$  dla wariantu 1 oraz  $V/S = 1,57$  dla wariantu 2. Każdą serię badań wykonywano na trzech próbkach. W obu wariantach próbki formowano na dwóch warstwach folii, aby wyeliminować możliwość ograniczenia odkształceń wynikających z tarcia. Deformacje skurczowe rejestrowano na podstawie przemieszczeń końców próbek, mierzonych czujnikami laserowymi o rozdzielczości  $2 \mu\text{m}$  [20]. Długość próbek umożliwiała rejestrację odkształceń z dokładnością  $3 \mu\text{m/m}$ . Pomiar odbywał się automatycznie co 5 minut przez okres 3 dni. Szczegółowe procedury formowania próbek w wariantcie 1 i 2 zostały opisane odpowiednio w publikacjach [21] i [22]. Celem badań było porównanie wpływu stosunku  $V/S$  oraz sposobu formowania próbek na rozwój wczesnych odkształceń skurczowych.



a)



b)

**Rys. 4.** Stanowiska badawcze do badania skurczu druku 3D: a) wariant 1 - próbki uformowane poprzez wyłaczanie pojedynczych warstw materiału z maszyny przyrostowej, bez dodatkowych zabiegów zagęszczania; b) wariant 2 - próbki zaformowane w półokrągłych korytkach liniowych i zagęszczone z wykorzystaniem stolika wibracyjnego.

### 2.3.3 Badanie parametrów mechanicznych (wytrzymałość na ściskanie i wytrzymałość na zginanie) stwardniałego kompozytu wykonanego w technologii druku 3D.

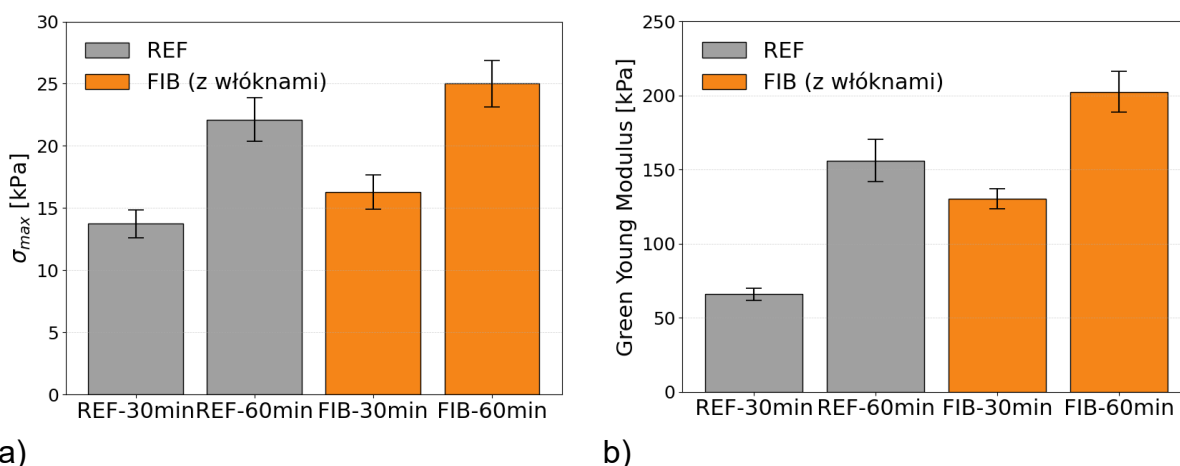
Wytrzymałość na ściskanie oraz wytrzymałość na zginanie określono po 28 dniach dojrzewania, zarówno dla próbek normowych o wymiarach 40 × 40 × 160 mm, jak i próbek wykonanych techniką druku 3D. Badania wykonano w analogii do normy [23]. W przypadku elementów drukowanych badania prowadzono w dwóch układach obciążenia: w kierunku pionowym („v”), gdzie siła działała prostopadłe do warstw i kierunku druku od góry próbki, oraz w kierunku poziomym („h”), gdzie obciążenie przykładano od boku, równoległe do warstw. Próbki drukowane liniowe przygotowano w taki sposób, aby ich wymiary były jak najbardziej zbliżone do wymiarów normowych beleczek 40 × 40 × 160 mm. Dodatkowo wykonano także próbki w formie wyciętych elementów o przesuniętych warstwach (O-2P, F-2P), wyciętych bezpośrednio z większego bloku betonu drukowanego. Rozkład kierunków badania próbek można znaleźć w publikacji [6].

Dla każdego rodzaju próbek wytrzymałość na zginanie wyznaczano na podstawie trzech pomiarów, natomiast wytrzymałość na ściskanie określano na podstawie sześciu wyników. W celu oceny zmienności uzyskanych rezultatów obliczono współczynnik zmienności (CoV) dla każdej serii badań.

## 3. Wyniki badań i dyskusja

Wyniki badań niestwardniałej mieszanki betonowej („green strength”) wykonano dla dwóch mieszanek bazowych REF oraz FIB. Wyniki przedstawiono na Rys. 5. Badania te wykazały, że dodatek włókien ASTRA polyemesh (FIB) zwiększa wartości naprężeń maksymalnych  $\sigma_{\max}$  w porównaniu do mieszanki referencyjnej (REF) zarówno po 30 min (wynik dla FIB jest wyższy o 18,3%) jak i po 60 minutach (wzrost o 13%). Należy zauważyć, że skuteczność włókien jest większa po czasie 30 minut. Ponadto należy zauważyć, że włókna w sposób statystycznie istotny przyczyniły się

do wzrostu sztywności niestwardniałej mieszanki betonowej (Rys. 5 b). Po 30 minutach próbka z dodatkiem włókien (FIB) miała sztywność określoną modułem Younga („Green Young Modulus”) o 98% większą niż mieszanka bez włókien, po 60 minutach różnica ta równa była około 30%. Potwierdza to fakt skuteczności zastosowanie włókien ASTRA polyemesh to zwiększenia nośności i sztywności mieszanki betonowej wykonanej w technologii druku 3D szczególnie w wczesnym jej okresie dojrzewania.

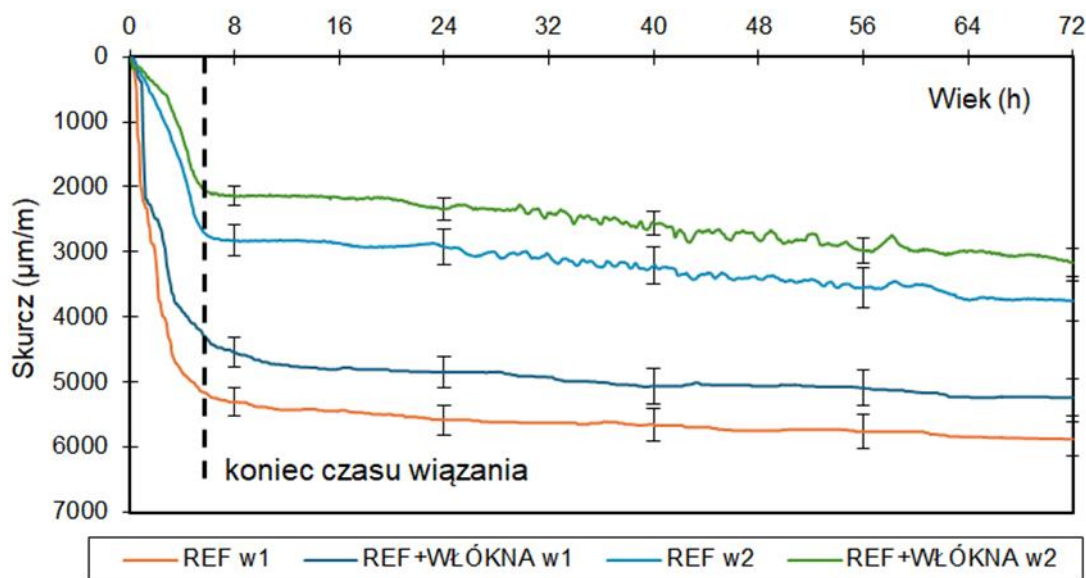


a) b)  
**Rys. 4.** Wyniki wytrzymałości (a) oraz modułu Younga (b) niestwardniałej mieszanki betonowej

Wyniki badań wczesnych odkształceń skurczowych przedstawiono na Rys. 6. Na wykresie zaznaczono przerywaną linią moment końca czasu wiązania, określony zgodnie z normą ASTM C403. Największy przyrost skurczu plastycznego zaobserwowano dla próbek liniowych w wariancie 1. W tym przypadku zastosowanie włókien poliolefinowych ograniczyło odkształcenia o ok. 18%. Podobną tendencję odnotowano w wariancie 2, gdzie dodatek włókien zmniejszył skurcz plastyczny o ok. 24%. Stosunek skurczu plastycznego między wariantami wynosi ok. 49% dla kompozytu bez włókien i 52% dla kompozytu z włóknami. Dwukrotnie większe odkształcenia plastyczne w wariancie 1 wynikają z niższego stosunku V/S oraz większej powierzchni wysychania, związanej z bardziej porowatą teksturą górnej powierzchni próbki, powstałą w wyniku braku zagęszczenia podczas wytłaczania. Dodatkowo można zauważyć, że dynamiczny rozwój skurczu plastycznego występuje później w wariancie 2. Wynika to z faktu, że zagęszczanie prowadzi do uzyskania płaskiej powierzchni, a w następstwie osiadania składników pojawia się krótkotrwałe zjawisko bleedingu. Zjawisko to zabezpiecza górną powierzchnię przed wysychaniem i opóźnia rozwój skurczu plastycznego, co nie występuje w próbkach wytłaczanych.

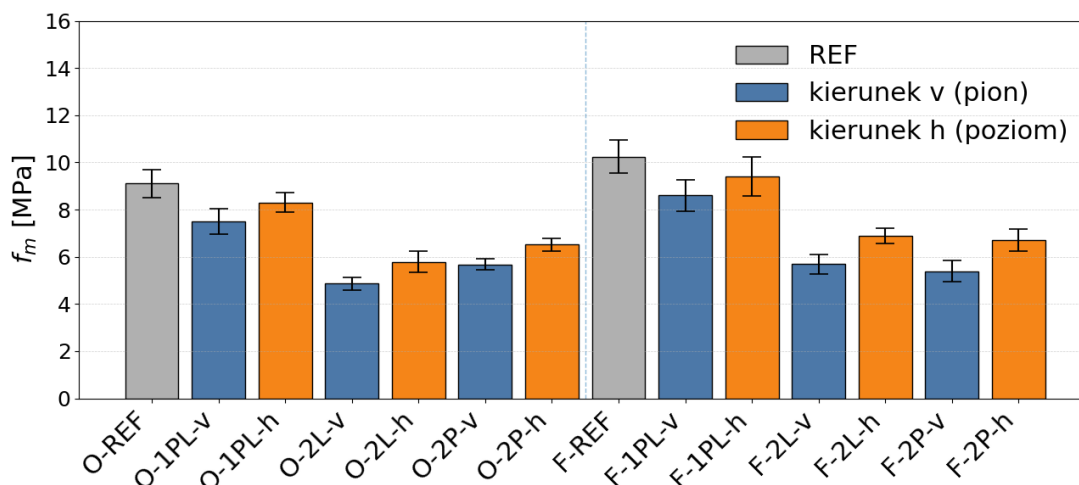
Moment końca czasu wiązania odpowiada punktowi przegięcia krzywej odkształceń, charakterystycznemu dla zmniejszenia dynamiki ich rozwoju. W fazie wczesnego twardnienia utrzymują się ogólne trendy obserwowane w stanie plastycznym, z tą różnicą, że próbki w wariancie 1 kurczą się mniej niż próbki w wariancie 2. Różnica ta zmniejsza się z 49 do 36% dla kompozytu bez włókien oraz z 52 do 40% dla kompozytu z włóknami. Większa stabilizacja rozwoju odkształceń wiąże się z ograniczoną utratą wody w próbkach, które intensywniej wysychały w fazie

plastycznej. Charakterystyczne fluktuacje odkształceń skurczowych obserwowane w próbkach wariantu 1 od ok 24 h są związane z rozwojem zjawiska curlingu, czyli podnoszenia się swobodnych końców próbek w wyniku ekspozycji wyłącznie powierzchni górnej oraz nierównomiernego wysychania materiału. Po 3 dniach wartość ugięcia wywołanego curlingiem w obu wariantach nie przekraczała 1 mm.



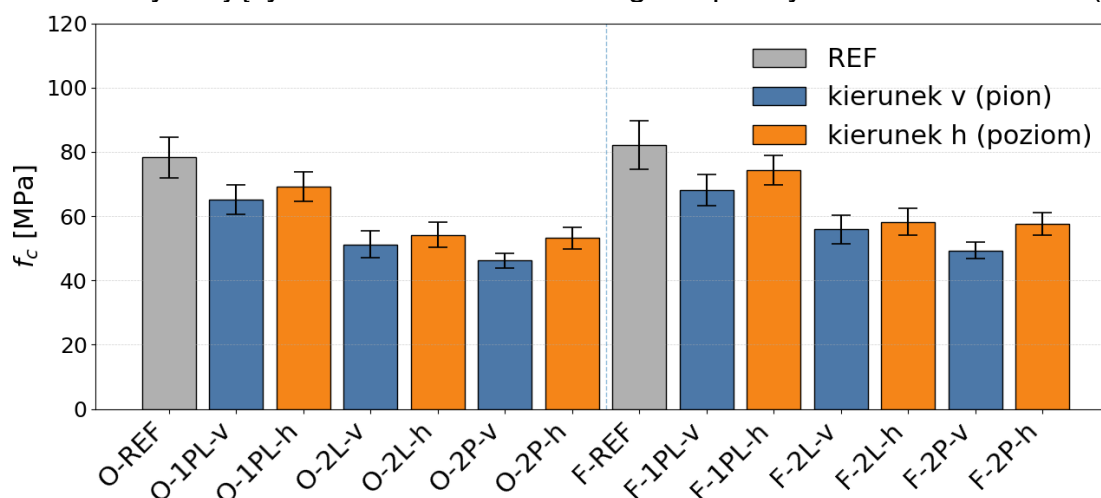
**Rys. 6.** Rozwój odkształceń skurczowych kompozytów cementowych z i bez włókien poliolefinowych w dwóch wariantach rejestracji wczesnych odkształceń.

Na Rys. 7 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na zginanie próbek normowych oraz wykonanych w technologii druku 3D kompozytów cementowych. Najwyższe wartości wytrzymałości na zginanie uzyskano dla próbek referencyjnych: 9,10 MPa dla betonu zwykłego i 10,24 MPa dla betonu z dodatkiem włókien. W próbkach liniowych (O-1PL, F-1PL) wytrzymałość w kierunku poziomym (h) była większa niż w pionowym (v). Różnice wyniosły 10,7% dla betonu bez włókien (7,50 vs. 8,30 MPa) oraz 9,5% dla betonu z włóknami (8,60 vs. 9,42 MPa). W próbkach warstwowych (O-2L, F-2L) również odnotowano wyższe wartości w kierunku h. Różnice wyniosły 19,1% dla betonu zwykłego (4,86 vs. 5,79 MPa) oraz 20,9% dla betonu z włóknami (5,69 vs. 6,88 MPa). W próbkach typu „P” z przesunięciem warstw (O-2P, F-2P) kierunek h dawał lepsze rezultaty. Różnice wyniosły 14,6% dla betonu bez włókien (5,68 vs. 6,51 MPa) i 24,5% dla betonu z włóknami (5,39 vs. 6,71 MPa). Kompozyt cementowy zbrojony włóknami we wszystkich przypadkach charakteryzował się wyższą wytrzymałością na zginanie niż kompozyt bez włókien, jednak zwiększenie nośności było w granicach do 17%.



**Rys. 7.** Wytrzymałość na zginanie próbek normowych i drukowanych

Na Rys. 8 przedstawiono wytrzymałość na ściskanie próbek normowych i drukowanych. Na podstawie uzyskanych wyników najwyższe wartości wytrzymałości na ściskanie stwierdzono dla próbek referencyjnych przygotowanych tradycyjnie: 78,22 MPa dla betonu zwykłego oraz 82,15 MPa dla betonu z dodatkiem włókien. W próbkach liniowych (O-1PL, F-1PL) widoczna jest wyraźna zależność kierunkowa – w kierunku poziomym (h) wytrzymałość była większa niż w pionowym (v). Różnice wyniosły 6,1% dla betonu bez włókien (65,15 vs. 69,15 MPa) oraz 9,1% dla betonu z włóknami (68,19 vs. 74,37 MPa). W próbkach warstwowych (O-2L, F-2L) również odnotowano wyższe wartości w kierunku poziomym. Różnice wyniosły odpowiednio 5,9% dla betonu zwykłego (51,15 vs. 54,15 MPa) oraz 4,2% dla betonu z włóknami (55,85 vs. 58,18 MPa). W próbkach z przesunięciem warstw typu „P” (O-2P, F-2P) utrzymała się ta sama tendencja. Wytrzymałość w kierunku poziomym przewyższała pionową o 15,1% w betonie bez włókien (46,16 vs. 53,15 MPa) oraz 16,9% w betonie z włóknami (49,32 vs. 57,65 MPa). We wszystkich przypadkach materiał z dodatkiem włókien charakteryzował się większą wytrzymałością na ściskanie niż materiał bez włókien. Należy jednak zaznaczyć, że wzrost wytrzymałości mieści się w granicach wartości wynikających z rozrzutu oznaczonego współczynnikiem zmienności (CoV).



**Rys. 8.** Wytrzymałość na ściskanie próbek normowych i drukowanych

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań wyprowadzono następujące wnioski:

- a) Włókna poliolefinowe (ASTRA polymesh) o długości 24 mm wpływają na podniesienie wytrzymałości  $\sigma_{\max}$  (green strength) i sztywności (green Young Modulus) niestwardniałej mieszanki na spoiwie cementowym. Wyniki badań wykazały, że dodatek włókien zwiększę  $\sigma_{\max}$  od 13 do 18%, natomiast Moduł Younga niestwardniałej mieszanki betonowej został zwiększony nawet o 100%.
- b) Wprowadzenie w topologii wydruku przesunięcia międzywarstwowego wpłynęło na wytrzymałość na ściskanie, zmniejszając ją o około 8%. Należy jednak zwrócić uwagę w przypadku wytrzymałości na zginanie występują próbki w których ten parametr uzyskał wzrost wytrzymałości w stosunku do próbek drukowanych bez przesunięcia warstw oraz próbki gdzie nastąpiło zmniejszenie wytrzymałości. W nawiązaniu do uzyskanych współczynników zmienności (do około 9%) należy zwrócić uwagę, że nie istnieje silny związek między zmianą parametrów mechanicznych stwardniałego kompozytu cementowego na przesunięciem warstw.
- c) Zmiana ilości wydrukowanych warstwa wpłynęła w sposób statystycznie istotny na parametry mechaniczne stwardniałego kompozytu, zwiększenie ilości warstw spowodowało spadek wytrzymałości na zginanie nawet o 38 % a na ściskania nawet o 24%. Uzyskany wynik jest zgodny z literaturą przedmiotu [8].
- d) Wprowadzenie włókien do mieszanki betonowej przyczyniło się do wzrostu wytrzymałości na ściskanie w zakresie do 10 %, co można uznać za wartość statystycznie nieistotną w kontekście podobnych wartości współczynnika zmienności. Wytrzymałość na zginania została zwiększona o maksymalnie 17 % (występują próbki w których ten efekt nie jest widoczny).
- e) Dodatek włókien poliolefinowych skutecznie ogranicza odkształcenia skurczowe zarówno w stanie plastycznym, jak i we wczesnym etapie twardnienia, przy czym efekt redukcji jest silniejszy w próbkach zagęszczanych.
- f) Stosunek objętości do powierzchni wysychania próbki oraz sposób jej formowania mają istotny wpływ na rozwój odkształceń skurczowych – próbki wytłaczane (wariant 1) wykazują większe odkształcenia plastyczne, co wynika z większej powierzchni wysychania.

Podsumowując złożona topologia wydruku polegająca na przesunięciu warstwy nie wpłynęła w sposób statystycznie istotny na uzyskane parametry mechaniczne stwardniałej mieszanki. Jednak badania potwierdziły, że ilość warstw miała znaczenia w kontekście uzyskanych parametrów mechanicznych (różnice w wynikach nawet o 38%). Ponadto wykazano, że włókna o długości 24 mm w sposób pozytywny wpłynęły na skurcz i parametry mechaniczne niestwardniałej mieszanki do druku 3D kompozytów cementowych.

#### 5. Finansowanie

Prace badawcze powstały m.in. w ramach realizacji projektu B+R nr LIDER13/0101/2022 pt.: Technologia inteligentnej pielęgnacji wewnętrznej niskoskurczowych kompozytów cementowych o obniżonym śladzie węglowym,

finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Zakres badawczy objęty projektem dotyczył zastosowania stanowiska do badań wczesnych odkształceń skurczowych w wariancie nr 2 wobec próbek wytłaczanych zgodnie z technologią przyrostową.

## 6. Literatura

- [1] Amin M, Agwa IS, Mashaan N, Mahmood S, Abd-Elrahman MH. Investigation of the Physical Mechanical Properties and Durability of Sustainable Ultra-High Performance Concrete with Recycled Waste Glass. *Sustainability* 2023;15(4):3085. <https://doi.org/10.3390/su15043085>.
- [2] Skibicki S, Federowicz K, Hoffmann M, Chougan M, Sibera D, Cendrowski K et al. Potential of Reusing 3D Printed Concrete (3DPC) Fine Recycled Aggregates as a Strategy towards Decreasing Cement Content in 3DPC. *Materials* 2024;17(11):2580. <https://doi.org/10.3390/ma17112580>.
- [3] Emad W, Salih Mohammed A, Kurda R, Ghafor K, Cavaleri L, M.A.Qaidi S et al. Prediction of concrete materials compressive strength using surrogate models. *Structures* 2022;46(6):1243–67. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.11.002>.
- [4] Girskas G, Kligys M. 3D Concrete Printing Review: Equipment, Materials, Mix Design, and Properties. *Buildings* 2025;15(12):2049. <https://doi.org/10.3390/buildings15122049>.
- [5] Sikora P, Techman M, Federowicz K, El-Khayatt AM, Saudi HA, Abd Elrahman M et al. Insight into the microstructural and durability characteristics of 3D printed concrete: Cast versus printed specimens. *Case Studies in Construction Materials* 2022;17:e01320. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01320>.
- [6] Skibicki S, Dvořák R, Pazdera L, Topolář L, Kocáb D, Alexa M et al. Anisotropic mechanical properties of 3D printed mortar determined by standard flexural and compression test and acoustic emission. *Construction and Building Materials* 2024;452(20):138957. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138957>.
- [7] Paul SC, Tay YWD, Panda B, Tan MJ. Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2018;18(1):311–9. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.02.008>.
- [8] Shakor P, Nejadi S, Sutjipto S, Paul G, Gowripalan N. Effects of deposition velocity in the presence/absence of E6-glass fibre on extrusion-based 3D printed mortar. *Additive Manufacturing* 2020;32:101069. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101069>.
- [9] Skibicki S, Techman M, Federowicz K, Olczyk N, Hoffmann M. Experimental Study of Hardened Young's Modulus for 3D Printed Mortar. *Materials (Basel)* 2021;14(24). <https://doi.org/10.3390/ma14247643>.
- [10] Le TT, Austin SA, Lim S, Buswell RA, Law R, Gibb AGF et al. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research* 2012;42(3):558–66. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.003>.
- [11] Liu C, Yue S, Zhou C, Sun H, Deng S, Gao F et al. Anisotropic mechanical properties of extrusion-based 3D printed layered concrete. *J Mater Sci* 2021;56(30):16851–64. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06416-w>.

- [12] Wolfs RJM, Bos FP, Salet TAM. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research* 2019;119:132–40. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>.
- [13] Rahul AV, Santhanam M, Meena H, Ghani Z. Mechanical characterization of 3D printable concrete. *Construction and Building Materials* 2019;227:116710. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116710>.
- [14] Nerella VN, Krause M, Näther M, Mechtcherine V. Studying printability of fresh concrete for formwork free Concrete on-site 3D Printing technology (CONPrint3D). In: 25th Conference on Rheology of Building Materials; 2016.
- [15] Skibicki S, Szewczyk P, Majewska J, Sibera D, Ekiert E, Chung S-Y et al. The effect of interlayer adhesion on stress distribution in 3D printed beam elements. *Journal of Building Engineering* 2024;87(2):109093. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109093>.
- [16] Wiłun Z. *Zarys geotechniki*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności; 2000.
- [17] Al-Noaimat YA, Chougan M, Albar A, Skibicki S, Federowicz K, Hoffman M et al. Recycled brick aggregates in one-part alkali-activated materials: Impact on 3D printing performance and material properties. *Developments in the Built Environment* 2023;16:100248. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100248>.
- [18] Casagrande L, Esposito L, Menna C, Asprone D, Auricchio F. Effect of testing procedures on buildability properties of 3D-printable concrete. *Construction and Building Materials* 2020;245:118286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118286>.
- [19] Skibicki S, Matyja M., Zieliński A, Federowicz K, Techman M, Filipowicz K et al. Projekt RPZP.01.01.00-32-0026/19, Prace badawczo-rozwojowe w zakresie rozwoju technologii przyrostowych oraz komercjalizacja wyników prac przez ORING-GUMY Małgorzata Aneta Matyja.
- [20] Federowicz K, Kaszyńska M, Zieliński A, Hoffmann M. Effect of Curing Methods on Shrinkage Development in 3D-Printed Concrete. *Materials* 2020;13(11):2590. <https://doi.org/10.3390/ma13112590>.
- [21] Zieliński A, Skibicki S. Wpływ składu kompozytów cementowych wykonanych w technologii druku 3D na rozwój odkształcen skurczowych. In: Deja J, Środa B, Gos P, Krechowiecki G, Konieczny D, Pilch Z, editors. *Monografie technologii betonu XII Konferencja Dni Betonu 2023*; 2023.
- [22] Zieliński A. Wpływ domieszek chemicznych zmniejszających napięcie powierzchniowe wody na wczesne odkształcenia skurczowe kompozytów cementowych. *CONSTRUCTION MATERIALS* 2024;1(8):8–15. <https://doi.org/10.15199/33.2024.08.02>.
- [23] EN 1015-11:2020. Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.

dr inż. Damian Dziuk<sup>1)</sup>  
dr inż. Artur Golda<sup>1)</sup>  
dr inż. Katarzyna Synowiec<sup>1)</sup>  
mgr inż. Patryk Wolny<sup>1)</sup>  
mgr inż. Michał Zapła<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o., Heidelberg Materials Polska

<sup>2)</sup> 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 CO<sub>2</sub>, stanowiące realną alternatywę dla tradycyjnego cementu portlandzkiego [1].

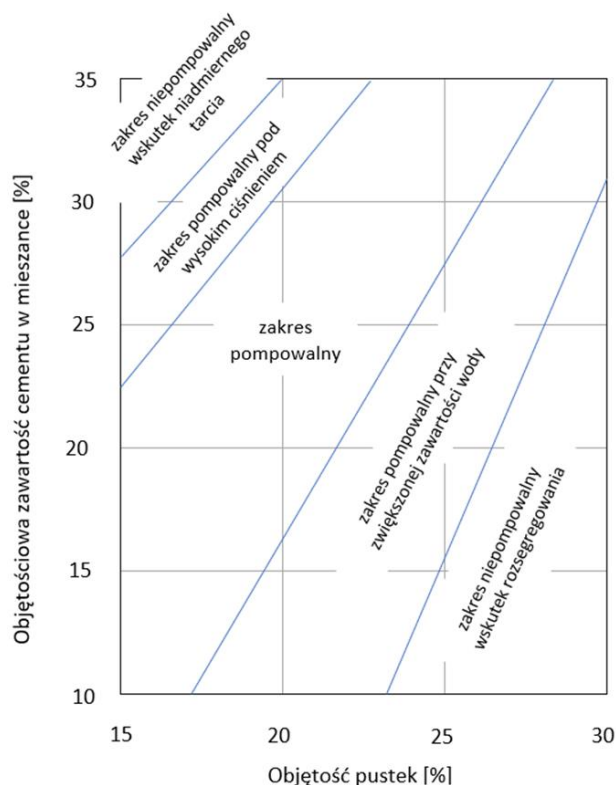
Projekt receptury mieszanki betonowej uzależniony jest od właściwości stwardniałego betonu, które powinny zostać osiągnięte po wyznaczonym okresie dojrzewania. Wytrzymałość oraz klasy ekspozycji w dużym stopniu wpływają na decyzję o ilości cementu, wody czy też rodzaju domieszki chemicznej. Natomiast 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 klastrow, 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 CO<sub>2</sub>/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 <sup>3</sup> ]               | 320                           |                         |
| Ilość wody [kg/m <sup>3</sup> ]                  | 179                           |                         |
| Ilość kruszywa 0-2mm [kg/m <sup>3</sup> ]        | 755                           |                         |
| Ilość kruszywa 2-8 i 8-16mm [kg/m <sup>3</sup> ] | 1025                          |                         |
| Rodzaj superplastyfikatora                       | MasterCO <sub>2</sub> re 3250 |                         |
| Ilość superplastyfikatora [kg/m <sup>3</sup> ]   | 3,20                          | 2,56                    |

Tabela 2. Emisyjność (GWP) cementów

| Rodzaj cementu          | GWP (kg CO <sub>2</sub> -eq/t brutto) | GWP (kg CO <sub>2</sub> -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 d<sub>90</sub>, 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).

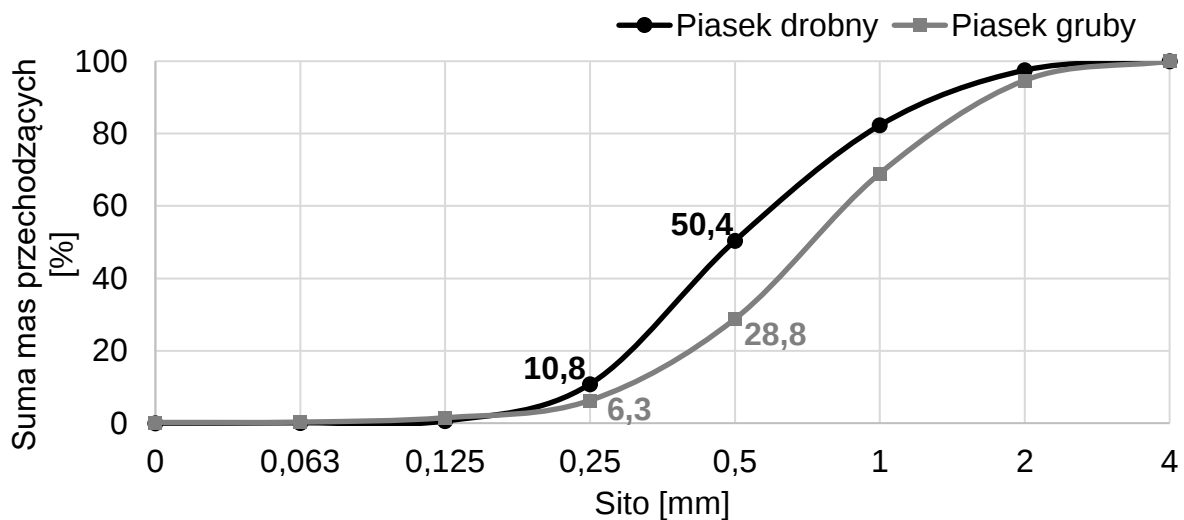
Tabela 3 Właściwości cementów

| Właściwość                                       | CEM I 42,5R | CEM II/B-M (S-LL) 42,5N |
|--------------------------------------------------|-------------|-------------------------|
| Wytrzymałość na ściskanie [MPa]<br>2 dni         | 27,2        | 18,3                    |
| Wytrzymałość na ściskanie [MPa]<br>28 dni        | 58,6        | 49,5                    |
| Początek czasu wiązania [min]                    | 210         | 235                     |
| Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]                     | 3,14        | 3,07                    |
| Stopień zmielenia wg Blaine [cm <sup>2</sup> /g] | ok. 3900    | ok. 4200                |
| Pozostałość na sicie 32µm [%]                    | 26,4        | 31,7                    |
| D <sub>90</sub> [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/m<sup>3</sup> (tabela 4). Pokreślić należy, że mieszanka nr 4 ma taki sam skład, jak mieszanka nr 3, różni się jedynie dodatkowym dozowaniem domieszki stabilizującej.

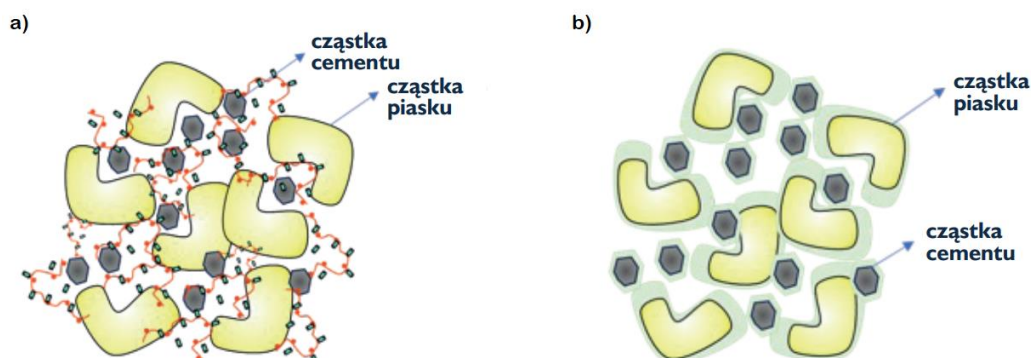
Tabela 4. Receptury mieszanek betonowych nr 3 i nr 4

| Składniki                                                | Mieszanka nr 3                | Mieszanka nr 4     |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Rodzaj cementu                                           | CEM II/B-M (S-LL) 42,5N       |                    |
| Ilość cementu [kg/m <sup>3</sup> ]                       | 300                           |                    |
| Ilość wody [kg/m <sup>3</sup> ]                          | 165                           |                    |
| Ilość kruszywa 0-2mm (piasek gruby) [kg/m <sup>3</sup> ] | 790                           |                    |
| Ilość kruszywa 2-8 i 8-16mm [kg/m <sup>3</sup> ]         | 1052                          |                    |
| Rodzaj superplastyfikatora                               | MasterCO <sub>2</sub> re 3250 |                    |
| Ilość superplastyfikatora [kg/m <sup>3</sup> ]           | 2,55                          |                    |
| Rodzaj domieszki stabilizującej                          | Nie stosowano                 | MasterMatrix LF600 |
| Ilość domieszki stabilizującej [kg/m <sup>3</sup> ]      |                               | 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 20dm<sup>3</sup> 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.



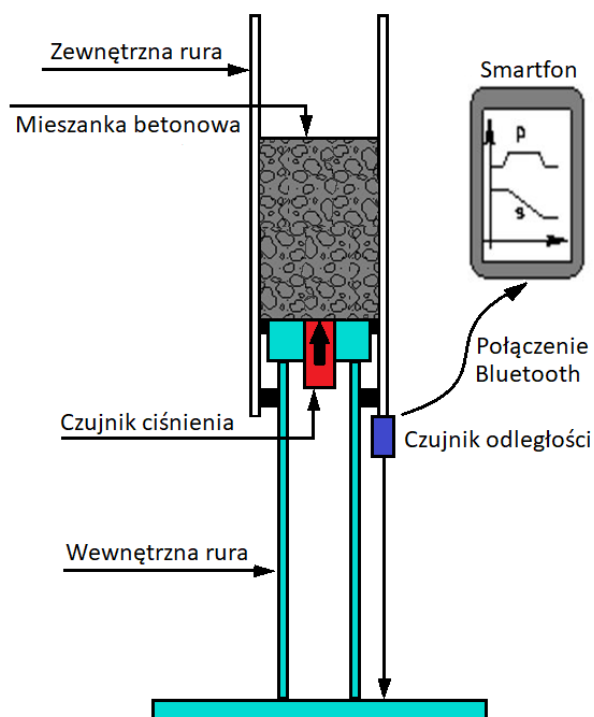
Rys. 5. Reometr ICAR Plus [8]

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:

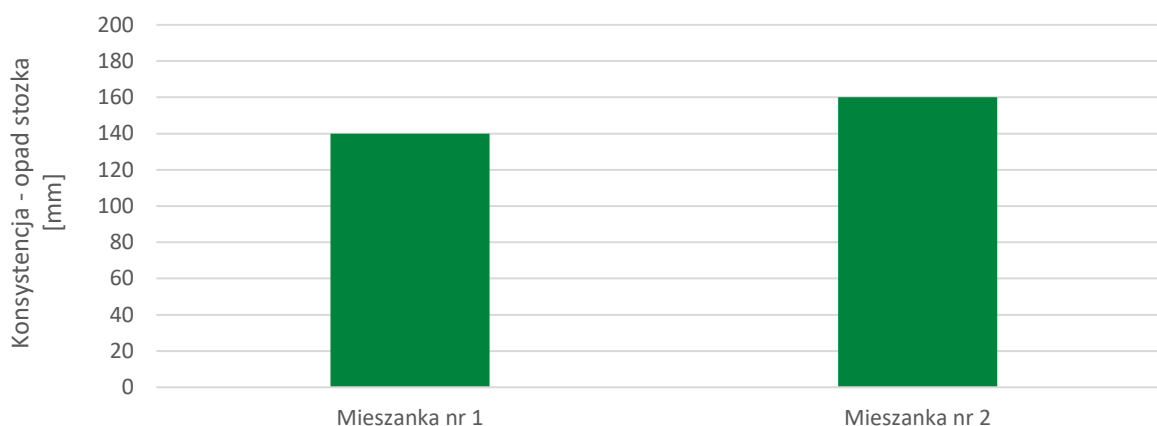
- Czy mieszanka jest pompowalna.  
Jeśli możliwe było przeprowadzenie testu oznacza to, że mieszanka jest pompowalna. Gdyby była na granicy stabilności (zbyt duży bleeding, oznaki segregacji) nastąpi wyciek wody (zaczynu) na styku rur (zewnętrznej i wewnętrznej), a wypłukane z zaczynem najdrobniejsze 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 wprawić 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

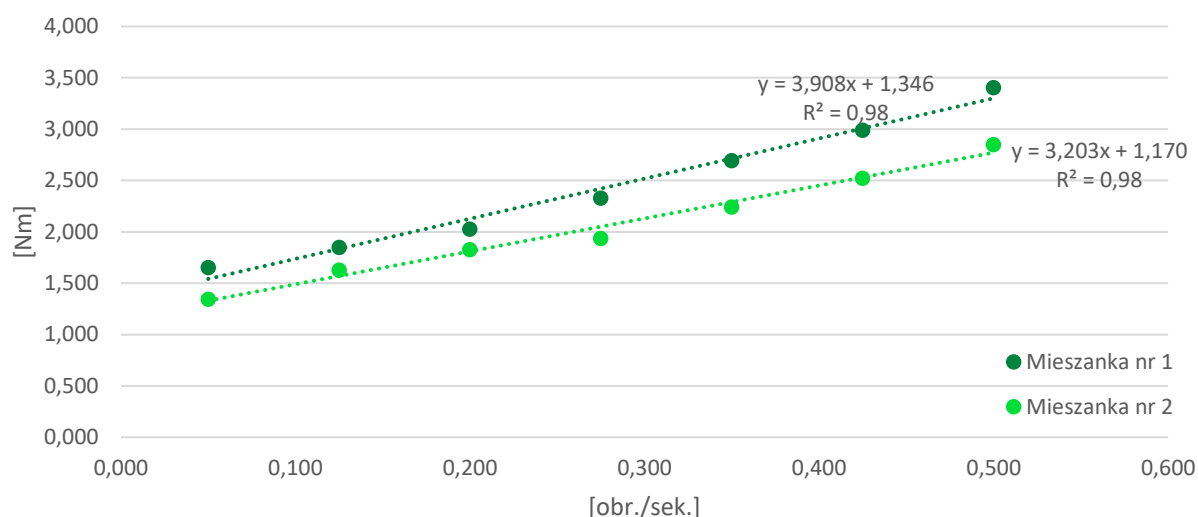
Po zbadaniu konsystencji wykonano pomiary reometrem ICAR Plus w celu określenia granicy płynięcia i lepkości plastycznej (tabela 5).

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

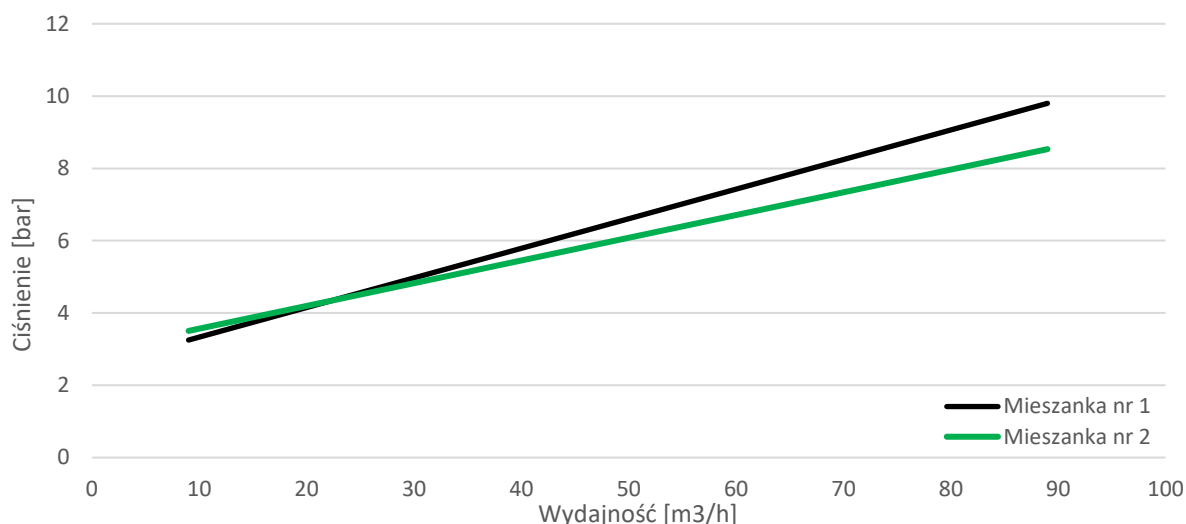
Podczas pomiaru pompowalności mieszanek (mieszanka nr 1 i nr 2, dla każdej 3 serie pomiarowe) przeprowadzono trzykrotne powtórzenie przy 5 różnych obciążeniach co daje w sumie 45 punktów pomiarowych dla każdej mieszanki. Następnie, na podstawie pomiarów, przeprowadzono symulację ciśnienia potrzebnego 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 |
| 9                | 3,51            | 3,22       | 3,78       |
| 89               | 8,84            | 9,22       | 7,53       |

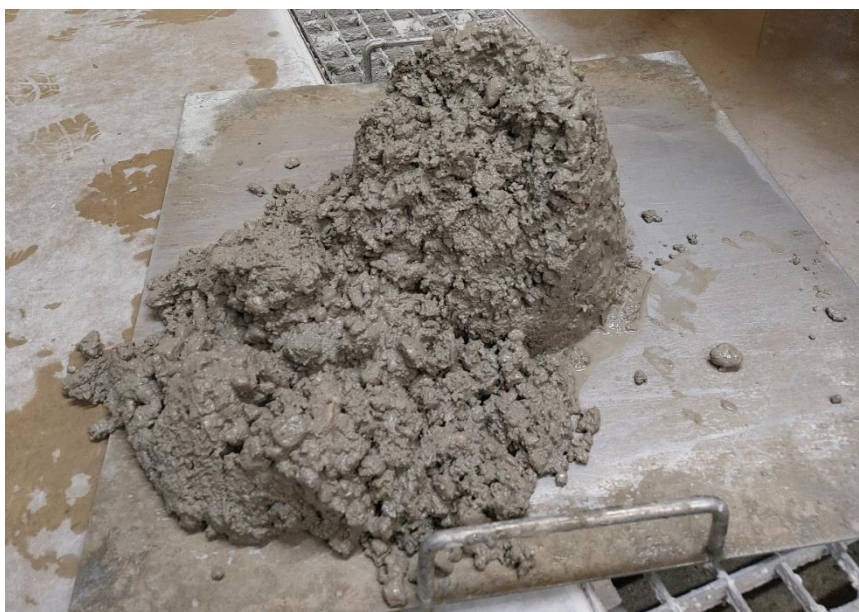
Wyniki przeprowadzonej symulacji w oparciu o pomiary podczas testu pompowalności na urządzeniu Sliper wykazały, że mieszanka nr 2 (CEM II/B-M (S-LL) 42,4N) przy wzrastającej wydajności pompowania wymaga mniejszego ciśnienia tłoczenia w

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).



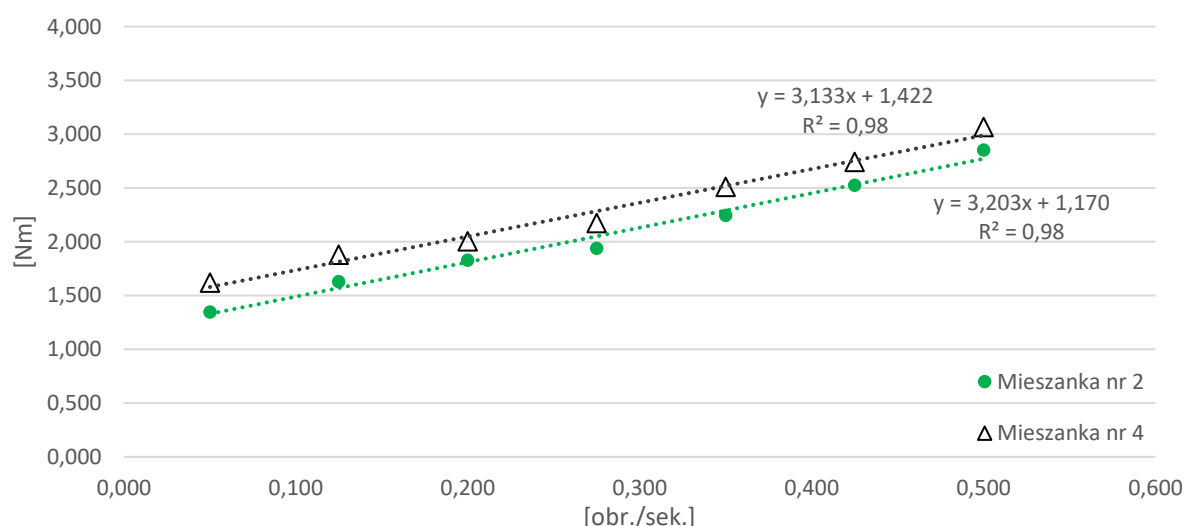
Rys. 10. Oznaczenie konsystencji mieszanki nr 3 metodą opadu stożka

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 spoistości 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.

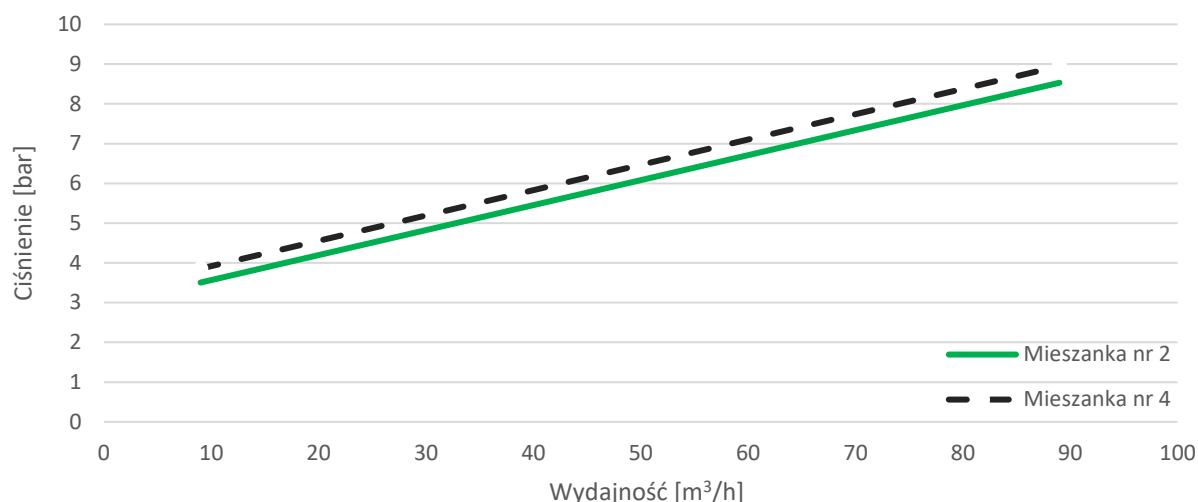
Tabela 7. Właściwości reologiczne mieszanki nr 4 w odniesieniu do mieszanki nr 2.

| 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 spoistości, 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 mieszankę 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](http://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/](http://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

**dr inż. Grzegorz Bajorek, Prof. PRz**

Politechnika Rzeszowska

Centrum Technologiczne Budownictwa Instytut Badań i Certyfikacji

ORCID 000-0001-5312-8866

**inż. Maciej Barć**

Centrum Technologiczne Budownictwa Instytut Badań i Certyfikacji

ORCID 000-0002-5921-4930

**mgr inż. Sabina Warchoń**

Centrum Technologiczne Budownictwa Instytut Badań i Certyfikacji

ORCID 0009-0001-9841-2606

**mgr inż. Łukasz Kosturkiewicz**

Stowarzyszenie Przemysłu Wapienniczego

ORCID 000-0003-2174-8256

**dr hab. inż. Izabela Skrzypczak**

Politechnika Rzeszowska

ORCID 0000-0003-0978-3040

**dr inż. Marta Kiernia-Hnat**

Centrum Technologiczne Budownictwa Instytut Badań i Certyfikacji

**dr inż. Wanda Kokoszka**

Politechnika Rzeszowska

ORCID:0000-0003-0486-9881

## **Analiza wpływu mączek wapiennych stosowanych poza branżą betonową na wybrane właściwości mieszanek i betonów zwykłych – studium przypadku dwuetapowego programu badawczego**

Analysis of the impact of limestone powders used outside the concrete industry on selected properties of mixtures and ordinary concretes – a case study of a two-stage research program

### **Streszczenie**

Celem artykułu było zbadanie możliwości wykorzystania wybranych mączek wapiennych dotychczas stosowanych głównie poza branżą betonową, jako częściowego lub całkowitego zamiennika popiołu lotnego w recepturach betonu zwykłego. Praca oparta jest na dwuetapowym programie badawczym przeprowadzonym w warunkach jednego węzła betoniarskiego w którym przeanalizowano wpływ ośmiu różnych mączek wapiennych na właściwości mieszanki betonowej oraz betonu stwardniałego. Badania objęły wykonanie 55 zarobów na podstawie których przeprowadzono ocenę konsystencji, urabialności, wytrzymałości na ściskanie oraz wybranych cech trwałościowych, przy uwzględnieniu zmiennego poziomu zastąpienia popiołu lotnego (50% i 100%). Wyniki wskazują na istotne różnice pomiędzy analizowanymi mączkami, zależne m.in. od ich składu chemicznego,

uziarnienia oraz pochodzenia przemysłowego. Wyniki potwierdzają możliwość zastosowania mączek wapiennych jako składnika receptur betonu, przy zachowaniu wymaganych właściwości użytkowych. Artykuł wskazuje potencjał technologiczny i środowiskowy tych dodatków w kontekście redukcji śladu węglowego i zgodności z założeniami strategii „5C”. Praca ma charakter aplikacyjny i stanowi punkt wyjścia do dalszych badań mikrostrukturalnych (SEM, MIP) oraz analiz ekonomicznych i środowiskowych (m.in. ślad węglowy).

## Abstract

The aim of the article was to investigate the potential use of selected limestone powders, previously applied mainly outside the concrete industry, as partial or complete replacements for fly ash in ordinary concrete mixtures designs. The study is based on a two-stage research program conducted at a single concrete batching plant, where the influence of eight different limestone powders on the properties of fresh and hardened concrete was analyzed. The experimental campaign included the production of 55 concrete batches, on the basis of which workability, consistency, compressive strength, and selected durability characteristics were assessed, considering two levels of fly ash replacement (50% and 100%). The results revealed significant differences between the tested powders, depending on their chemical composition, particle size distribution, and industrial origin. The findings confirm the feasibility of using limestone powders as components in concrete formulations while maintaining the required performance criteria. The article highlights the technological and environmental potential of these additives, particularly in terms of carbon footprint reduction and compliance with the "5C" strategy. This is an application-oriented study and provides a foundation for further microstructural investigations (SEM, MIP) as well as economic and environmental analyses (e.g., carbon footprint assessment).

## 1. Wstęp

Produkcja cementów i betonu jest istotnym źródłem emisji CO<sub>2</sub> i zużycia surowców, co w obliczu wyzwań klimatycznych i ograniczonych zasobów naturalnych wymaga zmian technologicznych. Coraz większe znaczenie zyskują cementy kompozytowe (w których znaczną część klinkieru zastępuje się materiałami pucolanowymi lub prawie obojętnymi np. popiołem lotnym lub mączką wapienną) [1]. Jednocześnie obserwuje się malejącą dostępność popiołu lotnego (w związku m.in. z redukcją spalania węgla), co stwarza potrzebę poszukiwania alternatywnych dodatków mineralnych [2, 3]. W tej sytuacji mączka wapienna stanowi korzystny materiał, ponieważ jest ubocznym produktem mielenia skał wapiennych, łatwo dostępnym w dużych ilościach i po atrakcyjnej cenie [2, 3]. Jej stosowanie może poprawić strukturę porów i gęstość betonu, zwiększając szczelność oraz wytrzymałość mechaniczną konstrukcji [4]. Przykładowo badania nad betonem ultrawytrzymałym (UHPC) z udziałem mączki wapiennej pokazują, że nawet bardzo wysoki udział tego dodatku pozwala uzyskać beton o wysokich parametrach technicznych przy jednoczesnym zmniejszeniu śladu węglowego i kosztów produkcji [5]. Zauważono ponadto, że dodatek mączki wapiennej poprawia uplastycznianie mieszanki i przyspiesza hydratację cementu, co sprzyja przyrostowi wytrzymałości i trwałości betonu [4].

Mechanizmy działania mączki wapiennej w betonie są dobrze udokumentowane. Drobne cząstki  $\text{CaCO}_3$  pełnią funkcję wypełniacza i mikroagregatu, wypełniają pory między ziarnami cementu, poprawiając stopień upakowania i zmniejszając porowatość [6]. Ponadto mączka wapienna działa jako „nukleator”, czyli zarodki krystalizacji produktów hydratacji (głównie CH oraz C–S–H), co przyspiesza proces wiązania cementu [1, 2]. Część  $\text{CaCO}_3$  może wchodzić w reakcje wtórne: modyfikując hydratację faz wodorotlenkowych i glinianów, prowadząc do tworzenia dodatkowych faz karboaluminianowych wapnia i karbo-silikatowych [1, 2]. W efekcie zastąpienie do 5–10% cementu mączką wapienną prowadzi do bardziej jednorodnej i gęstszej struktury matrycy cementowej, co w praktyce przekłada się na zwiększoną trwałość betonu [6]. Co istotne, badania Giergicznego i Piechówki [7] wykazały, że stopień zmielenia mączki wapiennej oraz jej udział procentowy wpływają istotnie na właściwości reologiczne zaczynu cementowego i zapraw, w tym granicę płynięcia oraz lepkość plastyczną. Wyniki te potwierdzają konieczność indywidualnej oceny materiału przed jego wprowadzeniem do receptur betonowych, szczególnie w kontekście współdziałania z domieszkami chemicznymi oraz dodatkami aktywnymi. W przypadku stosowania mączek wapiennych, należy pamiętać również o efekcie rozcieńczenia: przy zbyt dużym udziale mączki obniża się udział reaktywnych produktów hydratacji i tym samym spada wytrzymałość początkowa. Współdziałanie mączki wapiennej z innymi dodatkami (np. popiołem lotnym) jest obiecujące, mączka podnosi wytrzymałość wczesną przez wspomniany efekt przyspieszenia hydratacji, a popiół odpowiada za wzrost wytrzymałości w późniejszym okresie dzięki reaktywności pucolanowej [1]. W innym badaniu [8], analizowano zasadność stosowania mączki wapiennej jako substytutu cementu w betonach o niskim współczynniku woda/cement (w/c), wykorzystując model porowatości Powersa. Główna teza pracy opierała się na obserwacji, że w przypadku betonów wysokiej jakości (np. betonach mostowych czy przemysłowych), w których w/c spada poniżej 0,42, znaczna część cementu nie ulega pełnej hydratacji z powodu niedoboru wody lub ograniczonej przestrzeni porowej. W efekcie cement działa jedynie jako kosztowny wypełniacz, którego funkcję może przejąć tańsza i powszechnie dostępna mączka wapienna ( $\text{CaCO}_3$ ). Natomiast, w [9] przeprowadzono szczegółowe badania nad wykorzystaniem cementu portlandzkiego wapiennego (CEM II/A-LL 42,5 R-NA) w konstrukcyjnym betonie mostowym. Wykazano, że cement tego rodzaju może znacząco ograniczyć ślad węglowy w porównaniu z tradycyjnym cementem CEM I i to średnio o 12%. Badania potwierdzają, że beton z cementem wapiennym charakteryzuje się dobrą urabialnością, wysoką szczelnością, odpornością na cykliczne zamrażanie-odmrażanie i działanie soli odladzających, a także wyższą wytrzymałością wczesną dzięki efektowi zarodnikowania. Pomimo niższego ciepła hydratacji, beton ten spełnia wymagania normowe dla obiektów inżynierskich. Autorzy tych badań apelują o szersze stosowanie cementów niskoemisyjnych jako standardu w zrównoważonym budownictwie infrastrukturalnym. Również, z przeprowadzonych analiz w [7, 10] wynika, że zamiana nawet 10–15% cementu na mączkę wapienną nie prowadzi do pogorszenia właściwości wytrzymałościowych betonu po 28 dniach dojrzewania. Wręcz przeciwnie, przy odpowiednim stopniu rozdrobnienia mączki obserwuje się korzystne efekty związane z poprawą struktury porowej i zmniejszeniem porowatości kapilarnej. Co istotne, zastosowanie mączki wapiennej prowadzi także do istotnych korzyści środowiskowych, takich jak redukcja emisji  $\text{CO}_2$  oraz zmniejszenie zużycia klinkieru portlandzkiego. Praca [10] potwierdza, że w nowoczesnych recepturach

betonów niskoemisyjnych mączka wapienna może pełnić istotną rolę technologiczną i ekologiczną, stanowiąc ważny składnik strategii dekarbonizacji materiałów budowlanych.

Stosowanie mączki wapiennej ma też istotne znaczenie dla zrównoważonego rozwoju i realizacji strategii 5C (Klinkier–Cement–Beton–Budownictwo–Karbonatyzacja). W ramach tego podejścia beton wysokowartościowy (o wysokiej wytrzymałości i szczelności) pozwala na zmniejszenie zużycia cementu i wydłużenie trwałości konstrukcji, co redukuje emisje CO<sub>2</sub> oraz odpady budowlane [11]. Mączka wapienna wpisuje się w tę strategię, ponieważ przyczynia się do obniżenia zapotrzebowania na czysty cement i zwiększa odporność konstrukcji na czynniki korozyjne. Holistyczne podejście 5C podkreśla rolę cementu w ostatecznym produkcie (betonie) jako kluczowego materiału wpływającego na emisje CO<sub>2</sub> w budownictwie oraz potrzebę poszukiwania alternatywnych rozwiązań materiałowych, które umożliwiają jej skuteczną redukcję [11]. Przykładem takiego podejścia są badania przedstawione w pracy [12], w której analizowano zastosowanie mączki wapiennej uzyskanej z kamienia pochodzącego z rozbiórek w spoiwach cementowo-wapiennych, wskazujące na potencjał wtórnych surowców mineralnych jako elementu strategii dekarbonizacji. Również w pracy [2] częściowo zastępowano popiół lotny mączką wapienną, potwierdzając możliwość zmniejszenia ilości cementu i popiołu bez negatywnego wpływu na jakość betonu. W świetle zaprezentowanych danych, zasadne wydaje się prowadzenie dalszych badań aplikacyjnych nad wykorzystaniem mączek wapiennych spoza sektora cementowego, celem pełnej oceny ich właściwości i potencjału technologicznego. W związku z tym konieczne są wieloaspektowe badania (takie jak przedstawiony poniżej dwuetapowy program badawczy) w warunkach praktycznych, aby zweryfikować wpływ różnych rodzajów mączki wapiennej na właściwości mieszanek i betonów zwykłych oraz w pełni ocenić ich przydatność dla niskoemisyjnego budownictwa.

Pomimo wielu artykułów naukowych oraz popularno-naukowych dotyczących ogólnych właściwości mączek wapiennych, nadal brakuje badań analizujących praktyczną przydatność mączek stosowanych dotychczas poza branżą betonową, np. w przemyśle szklarskim, papierniczym czy stalowym. Tego rodzaju materiały, dostępne na rynku w formie gotowych produktów, mogą stanowić lokalne źródło zamienników dla dodatków typu II, takich jak popiół lotny, którego dostępność w Polsce systematycznie się zmniejsza. Istnieje zatem potrzeba zweryfikowania, czy takie mączki, nieprodukowane z myślą o zastosowaniu w betonie, mogą spełniać wymagania technologiczne oraz normowe w produkcji betonu towarowego. Dlatego, celem niniejszej pracy było przeprowadzenie aplikacyjnego badania porównawczego obejmującego ocenę wpływu ośmiu różnych mączek wapiennych, stosowanych dotąd głównie poza branżą betonową, na wybrane właściwości świeżej mieszanki betonowej oraz betonu stwardniałego. Program badawczy miał charakter dwuetapowy i został zrealizowany w warunkach produkcyjnych jednego z węzłów betoniarskich, z wykorzystaniem dwóch wyjściowych receptur betonu zwykłego i jednej receptury docelowej. Analizowano parametry takie jak konsystencja, wytrzymałość na ściskanie, wnikanie wody pod ciśnieniem, z uwzględnieniem zmiennego poziomu zastąpienia popiołu lotnego, 50% oraz 100%.

Hipotezy badawcze przyjęte w pracy zakładały, że:

- ☐ Niektóre mączki wapienne stosowane poza branżą betonową mogą być wykorzystane jako skuteczny zamiennik popiołu lotnego w betonie zwykłym bez pogorszenia jego kluczowych właściwości użytkowych.
- ☐ Właściwości mączek, takie jak uziarnienie i pochodzenie, mogą mieć istotny wpływ na parametry mieszanki betonowej i betonu.
- ☐ Różnice pomiędzy mączkami mają charakter istotny technologicznie i umożliwiają selektywny dobór materiału w zależności od oczekiwanych właściwości betonu.

Praca ma charakter aplikacyjny i stanowi punkt wyjścia do dalszych analiz mikrostrukturalnych (SEM, MIP) oraz ocen ekonomiczno-środowiskowych, w tym związanych z bilansem śladu węglowego i efektywnością kosztową transportu materiałów.

## 2. Podstawy formalne stosowania mączki wapiennej w betonie

Zgodnie z normą PN-EN 206 [13], beton to kompozyt składający się z cementu, kruszyw grubych i drobnych, wody oraz opcjonalnie domieszek, dodatków lub włókien. Składniki te mogą być stosowane, o ile ich przydatność została wykazana zgodnie z wymaganiami norm europejskich. W przypadku braku odpowiednich norm EN, dopuszcza się alternatywne podstawy dopuszczenia, takie jak Europejska Ocena Techniczna (EOT) lub krajowe regulacje, np. Polska Norma (PN) czy Krajowa Ocena Techniczna (KOT).

Ze względu na bardzo drobne uziarnienie, mączki wapienne mieszczą się w definicji dodatku według PN-EN 206 [13], czyli nieorganicznego składnika drobnoziarnistego dodawanego w celu modyfikacji właściwości betonu. Wyróżnia się dwa typy dodatków:

- ☐ Typ I – niemal obojętny,
- ☐ Typ II – pucolanowy lub o właściwościach hydraulicznych utajonych.

Dodatki typu II, takie jak popiół lotny, pył krzemionkowy czy zmielony żużel wielkopiecowy, posiadają status wyrobów budowlanych zgodnie z odpowiednimi normami EN (np. EN 450-1 [14], EN 13263-1 [15], EN 15167-1 [16]) i są znakowane znakiem CE.

Mączki wapienne, pozbawione aktywności pucolanowej i hydraulicznej, kwalifikują się jako dodatki typu I. Ich przydatność ocenia się według wymagań dla kruszywa wypełniającego, zgodnie z PN-EN 12620 [17]. Zgodnie z definicją, kruszywo wypełniające to frakcja, której większość przechodzi przez sito o oczku 0,063 mm, i która wpływa na właściwości materiałów budowlanych. Istotne jest, by nie utożsamiać tych produktów z pyłami, które są jedynie podzbiorem tej kategorii. Wymagania dla uziarnienia kruszywa wypełniającego przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Wymagania dotyczące uziarnienia kruszywa wypełniającego (wg PN-EN 12620 [17])

| Wymiar sita (mm)                                                                                                                                                                       | Ogólny zakres przechodzącej masy (%) | Maksymalny zakres deklarowany przez producenta <sup>a)</sup> | Wymiar sita (mm) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------|
| 2                                                                                                                                                                                      | 100                                  | –                                                            | 2                |
| 0.125                                                                                                                                                                                  | 85–100                               | 10                                                           | 0.125            |
| 0.063                                                                                                                                                                                  | 70–100                               | 10                                                           | 0.063            |
| Uwaga: <sup>a)</sup> Zakres uziarnienia deklarowany na podstawie ostatnich 20 wyników. 90% z nich musi mieścić się w zakresie deklarowanym, wszystkie muszą spełniać wymagania ogólne. |                                      |                                                              |                  |

Ponadto zgodnie z p. 4.7 normy PN-EN 12620 [17], należy ocenić potencjalną szkodliwość pyłów. W tym celu norma oferuje cztery kryteria oceny, z których najtrafniejsze w przypadku mączek wapiennych jest potwierdzenie ich nieszkodliwości przez wykazanie udanego zastosowania w betonie. W praktyce oznacza to przeprowadzenie badań wstępnych zgodnie z załącznikiem A normy PN-EN 206 [13], które obejmują ocenę wpływu mączki na konsystencję, wytrzymałość i trwałość betonu.

### 3. Zakres badań

Z uwagi na cel badawczy, jakim było potwierdzenie przydatności dostępnych na rynku mączek wapiennych stosowanych dotychczas poza branżą betonową, opracowano dwuetapowy program eksperymentalny. Końcowym efektem była ocena możliwości zastosowania tych mączek jako zamiennika popiołu lotnego oraz częściowo cementu w betonie zwykłym, wraz z opracowaniem gotowych receptur.

W pierwszym etapie przebadano osiem mączek wapiennych, wytypowanych przez producentów zrzeszonych w Stowarzyszeniu Przemysłu Wapienniczego. Ich zróżnicowane pochodzenie oraz uziarnienie miało kluczowe znaczenie dla właściwości mieszanki i betonu stwardniałego. Do badań wybrano dwie wzorcowe receptury betonu klasy C12/15 i C20/25, w których zastosowano cement CEM I 42,5R oraz popiół lotny w maksymalnej normowej ilości 33% masy cementu.

Popiół zastępowano mączkami wapiennymi w ilości 50% oraz 100%, co dało łącznie 34 zaroby. Dla każdej mieszanki analizowano konsystencję, napowietrzenie, wytrzymałość na ściskanie po 7 i 28 dniach oraz głębokość penetracji wody.

Na podstawie uzyskanych wyników wytypowano trzy mączki (C, D, H), które w drugim etapie wykorzystano w recepturze betonu klasy C30/37 i klasie ekspozycji XC4. Popiół lotny w tej recepturze zastąpiono mączkami w ilości odpowiadającej 7,5% oraz 15% masy cementu, co przełożyło się na 6 wariantów betonu. Dla każdej z receptur wykonano 3 niezależne zaroby (łącznie 21), a uzyskane wyniki przedstawiono jako wartości średnie. Badaniom w tym etapie poddano konsystencję, napowietrzenie, wytrzymałość na ściskanie (28 dni), wytrzymałość na zginanie, rozciąganie przy rozłupywaniu, penetrację wody oraz mrozoodporność (F150).

W celu obiektywnej oceny wpływu mączek wapiennych zastosowano testy statystyczne, w tym test Levene'a do oceny homogeniczności wariancji oraz analizę wariancji ANOVA. Test Levene'a pozwolił ocenić, czy zmienność wyników w różnych wariantach (50%, 100%, wzorcowy) jest porównywalna. Wyniki wykazały brak istotnych różnic między poszczególnymi parametrami analizowanych betonów.

Wyniki szczegółowych analiz statystycznych zestawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Zestawienie wartości testu Levene'a przeprowadzonego dla wybranych właściwości betonów klasy C12/15 oraz C20/25 modyfikowanych dodatkiem mączki wapiennej

| <b>Beton klasy C12/15 z 50% udziałem mączki</b>   |                        |                            |                 |                   |               |               |
|---------------------------------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------|-------------------|---------------|---------------|
|                                                   | Źródło zmienności      | Liczba stopni swobody (df) | Suma kwadratów  | Średnia kwadratów | Statystyka F  | Wartość p     |
| <b>Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach</b>      | Grupy (między grupami) | 8                          | 0.3585          | 0.04481           | 0.6436        | <b>0.732</b>  |
|                                                   | Błąd (wewnątrz grup)   | 18                         | 1.2533          | 0.06963           |               |               |
|                                                   | <b>Razem</b>           | <b>26</b>                  | <b>1.6119</b>   | <b>0.06199</b>    |               |               |
|                                                   | Źródło zmienności      | Liczba stopni swobody (df) | Suma kwadratów  | Średnia kwadratów | Statystyka F  | Wartość p     |
| <b>Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach</b>     | Grupy (między grupami) | 8                          | 0.5741          | 0.07176           | 0.3784        | <b>0.9184</b> |
|                                                   | Błąd (wewnątrz grup)   | 18                         | 3.4133          | 0.1896            |               |               |
|                                                   | <b>Razem</b>           | <b>26</b>                  | <b>3.9874</b>   | <b>0.1534</b>     |               |               |
|                                                   | Źródło zmienności      | Liczba stopni swobody (df) | Suma kwadratów  | Średnia kwadratów | Statystyka F  | Wartość p     |
| <b>Głębokość penetracji wody [mm]</b>             | Grupy (między grupami) | 8                          | 80              | 10                |               |               |
|                                                   | Błąd (wewnątrz grup)   | 18                         | 286.6666        | 15.9259           |               |               |
|                                                   | <b>Razem</b>           | <b>26</b>                  | <b>366.6666</b> | <b>14.1026</b>    | <b>0.6279</b> | <b>0.7442</b> |
| <b>Beton klasy C12/15 z 100 % udziałem mączki</b> |                        |                            |                 |                   |               |               |
|                                                   | Źródło zmienności      | Liczba stopni swobody (df) | Suma kwadratów  | Średnia kwadratów | Statystyka F  | Wartość p     |
| <b>Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach</b>      | Grupy (między grupami) | 8                          | 1.2319          | 0.154             | 1.1517        | <b>0.3782</b> |
|                                                   | Błąd (wewnątrz grup)   | 18                         | 2.4067          | 0.1337            |               |               |
|                                                   | <b>Razem</b>           | <b>26</b>                  | <b>3.6385</b>   | <b>0.1399</b>     |               |               |
|                                                   | Źródło zmienności      | Liczba stopni swobody (df) | Suma kwadratów  | Średnia kwadratów | Statystyka F  | Wartość p     |
| <b>Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach</b>     | Grupy (między grupami) | 8                          | 0.6341          | 0.07926           | 0.3985        | <b>0.9069</b> |
|                                                   | Błąd (wewnątrz grup)   | 18                         | 3.58            | 0.1989            |               |               |
|                                                   | <b>Razem</b>           | <b>26</b>                  | <b>4.2141</b>   | <b>0.1621</b>     |               |               |
|                                                   | Źródło zmienności      | Liczba stopni swobody (df) | Suma kwadratów  | Średnia kwadratów | Statystyka F  | Wartość p     |
| <b>Głębokość penetracji wody [mm]</b>             | Grupy (między grupami) | 8                          | 112.9629        | 14.1204           | 0.8009        | <b>0.6097</b> |
|                                                   | Błąd (wewnątrz grup)   | 18                         | 317.3333        | 17.6296           |               |               |
|                                                   | <b>Razem</b>           | <b>26</b>                  | <b>430.2963</b> | <b>16.5499</b>    |               |               |
| <b>Beton klasy C20/25 z 50% udziałem mączki</b>   |                        |                            |                 |                   |               |               |
|                                                   | Źródło zmienności      | Liczba stopni swobody (df) | Suma kwadratów  | Średnia kwadratów | Statystyka F  | Wartość p     |

|                                                   |                        |                            |                |                   |              |               |
|---------------------------------------------------|------------------------|----------------------------|----------------|-------------------|--------------|---------------|
| Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach             | Grupy (między grupami) | 8                          | 0.68           | 0.085             | 0.219        | <b>0.9829</b> |
|                                                   | Błąd (wewnątrz grup)   | 18                         | 6.9867         | 0.3881            |              |               |
|                                                   | Razem                  | 26                         | 7.6667         | 0.2949            |              |               |
| Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach            | Źródło zmienności      | Liczba stopni swobody (df) | Suma kwadratów | Średnia kwadratów | Statystyka F | Wartość p     |
|                                                   | Grupy (między grupami) | 8                          | 0.4007         | 0.05009           | 0.1791       | <b>0.991</b>  |
|                                                   | Błąd (wewnątrz grup)   | 18                         | 5.0333         | 0.2796            |              |               |
|                                                   | Razem                  | 26                         | 5.4341         | 0.209             |              |               |
| Głębokość penetracji wody [mm]                    | Źródło zmienności      | Liczba stopni swobody (df) | Suma kwadratów | Średnia kwadratów | Statystyka F | Wartość p     |
|                                                   | Grupy (między grupami) | 8                          | 113.333        | 14.1667           | 0.5933       | <b>0.7733</b> |
|                                                   | Błąd (wewnątrz grup)   | 18                         | 430.667        | 23.926            |              |               |
|                                                   | Razem                  | 26                         | 544            | 20.923            |              |               |
| <b>Beton klasy C12/15 z 100 % udziałem mączki</b> |                        |                            |                |                   |              |               |
| Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach             | Źródło zmienności      | Liczba stopni swobody (df) | Suma kwadratów | Średnia kwadratów | Statystyka F | Wartość p     |
|                                                   | Grupy (między grupami) | 8                          | 0.4956         | 0.06195           | 0.7624       | <b>0.6320</b> |
|                                                   | Błąd (wewnątrz grup)   | 18                         | 1.462          | 0.0812            |              |               |
|                                                   | Razem                  | 26                         | 1.9576         | 0.0753            |              |               |
| Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach            | Źródło zmienności      | Liczba stopni swobody (df) | Suma kwadratów | Średnia kwadratów | Statystyka F | Wartość p     |
|                                                   | Grupy (między grupami) | 8                          | 0.4785         | 0.05981           | 0.6333       | <b>0.7350</b> |
|                                                   | Błąd (wewnątrz grup)   | 18                         | 1.702          | 0.0946            |              |               |
|                                                   | <b>Razem</b>           | 26                         | 2.1805         | 0.0839            |              |               |
| Głębokość penetracji wody [mm]                    | Źródło zmienności      | Liczba stopni swobody (df) | Suma kwadratów | Średnia kwadratów | Statystyka F | Wartość p     |
|                                                   | Grupy (między grupami) | 8                          | 112.0000       | 14.0000           | 0.7018       | <b>0.6690</b> |
|                                                   | Błąd (wewnątrz grup)   | 18                         | 286.667        | 15.926            |              |               |
|                                                   | Razem                  | 26                         | 398.667        | 15.307            |              |               |

We wszystkich analizowanych przypadkach wartość p przekracza próg istotności ( $\alpha = 0.05$ ), co oznacza brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej ( $H_0$ ) o jednorodności wariancji między grupami. Otrzymane wartości statystyki F mieszczą się w przedziale akceptacji, a sumy kwadratów międzygrupowych są relatywnie niewielkie. Test Levene'a potwierdził brak statystycznie istotnych różnic wariancji pomiędzy mieszankami betonowymi z dodatkiem mączki wapiennej. Otrzymane wyniki

umożliwiają dalsze porównywanie średnich z założeniem homogeniczności wariancji. Mączki wapienne, stosowane w ilości 50% i 100% jako zamiennik popiołu lotnego, nie powodują istotnych statystycznie różnic w zmienności kluczowych parametrów betonu. Potwierdza to ich potencjał jako pełnowartościowego składnika mieszanek betonowych, zgodnego z założeniami zrównoważonego rozwoju i obniżania śladu węglowego.

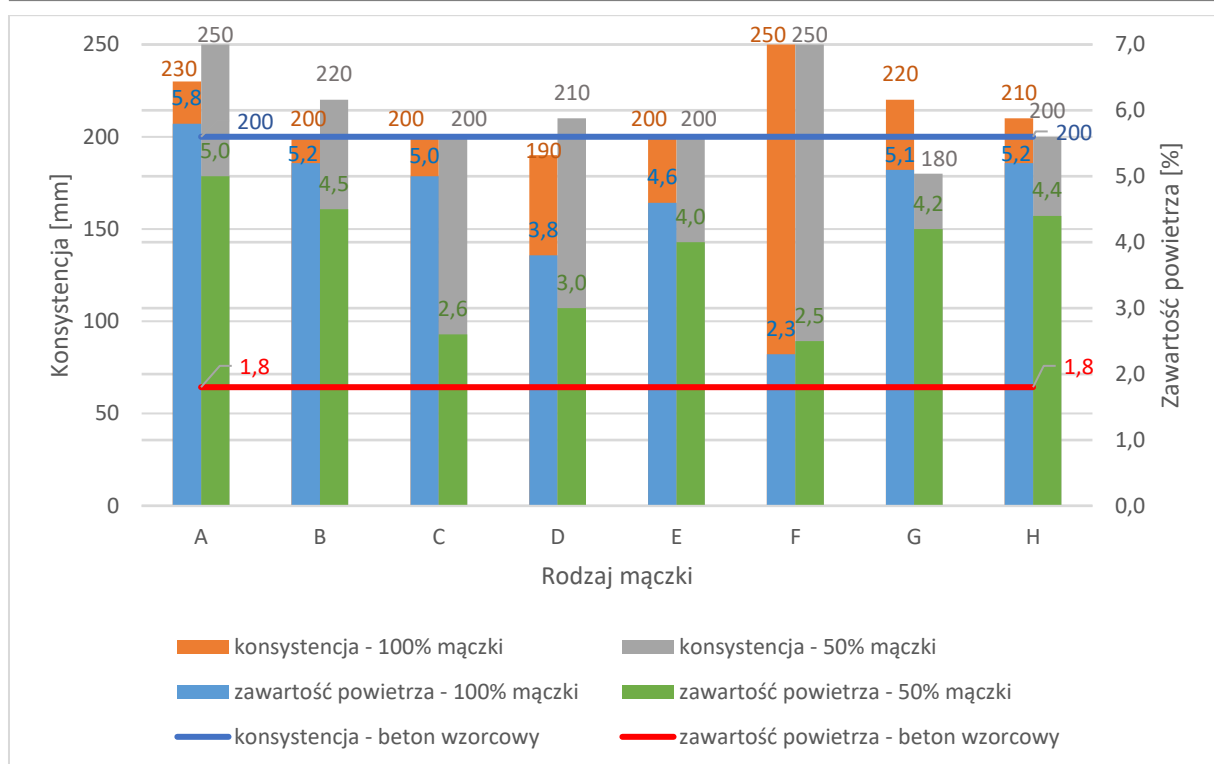
## 4. Wyniki badań i ich ocena

### 4.1. Etap 1 badań

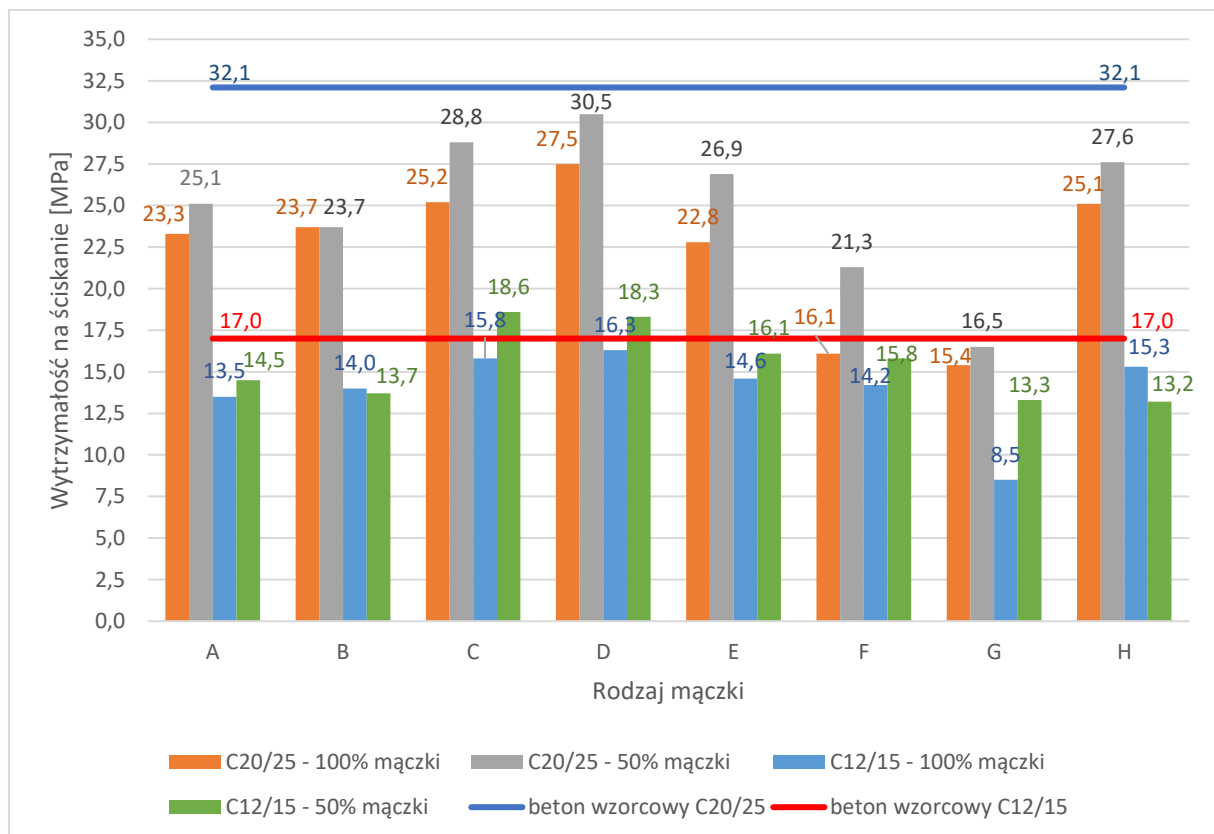
We wszystkich wariantach badanych receptur zastosowano stały skład mieszanki, bez korekt wynikających z różnic w gęstości dodatków oraz bez dostosowywania zawartości wody zarobowej. W efekcie zachowano stały wskaźnik w/c przy zmiennej, niekiedy istotnie, zawartości powietrza. Analiza właściwości mieszanki betonowej wymagała jednoczesnego uwzględnienia zarówno konsystencji, jak i stopnia jej napowietrzenia, ze względu na wzajemne powiązania tych parametrów i ich wpływ na właściwości stwardniałego betonu. Wyniki przedstawione na rysunku 1 wskazują, że zastosowanie mączek wapiennych nie miało negatywnego wpływu na urabialność mieszanki betonowej, ocenianą na podstawie opadu stożka. Zaobserwowano wręcz tendencję do jej lekkiego upłynnienia, co może świadczyć o zbliżonej wodożądności mączek wapiennych względem popiołu lotnego. Dodatkowo, wyższy poziom napowietrzenia mógł pozytywnie wpływać na konsystencję, pełniąc funkcję „smarującą” w strukturze mieszanki i ułatwiając jej przepływ. Wpływ mączek wapiennych na stopień napowietrzenia był zróżnicowany, jednak ogólnie obserwowano tendencję do ułatwionego wprowadzania powietrza do mieszanki, co mogło istotnie wpływać zarówno na uzyskiwane wartości wytrzymałości na ściskanie (rys. 2), jak i na szczelność struktury betonu (rys. 3).

Wytrzymałość na ściskanie w 28. dniu dojrzewania wykazywała obniżenie względem betonu wzorcowego, jednak pomimo znacznych dawek mączki wapiennej (odpowiednio 16,5% i 33% masy cementu dla 50% i 100% zastąpienia popiołu lotnego), spadki te nie przekroczyły kilkunastu procent. Takie rezultaty należy uznać za satysfakcjonujące i akceptowalne z inżynierskiego punktu widzenia. Przeprowadzona analiza statystyczna z wykorzystaniem testu Levene’a potwierdziła jednorodność wariancji oraz brak istotnych różnic pomiędzy grupami, co wzmacnia wiarygodność uzyskanych danych (tab. 2). Tym samym potwierdza się klasyfikacja mączek wapiennych jako dodatków typu I, zgodnie z normą PN-EN 206 [13], chemicznie prawie obojętnych, lecz ze względu na zróżnicowaną mineralogię i uziarnienie mogących pełnić funkcję zarodków krystalizacji faz C–S–H, wspomagając proces hydratacji i korzystnie wpływając na trwałość struktury cementowej.

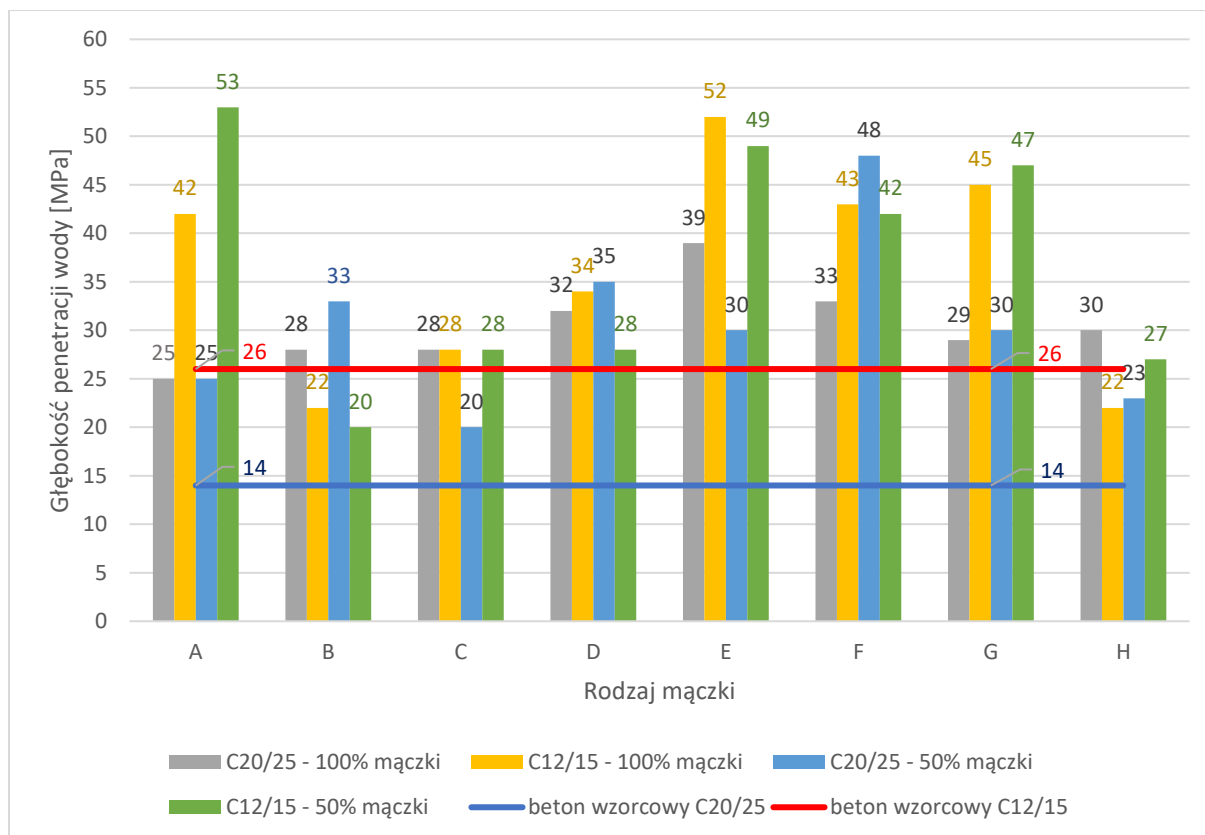
Z kolei wyniki dotyczące głębokości penetracji wody (rys. 3) wskazują na pewne pogorszenie szczelności w porównaniu do betonu referencyjnego, co jest uzasadnione zastąpieniem aktywnego dodatku pucolanowego mniej reaktywną mączką wapienną. Niemniej jednak, we wszystkich przypadkach wartości te nie przekraczały 60 mm, a większość mieściła się poniżej 40 mm, co oznacza spełnienie wymagań stawianych betonowi w klasie ekspozycji XA3 według dokumentu WWiORB GDDKiA [18].



Rys. 1. Wpływ rodzaju i zawartości mączki na konsystencję mieszanki betonowej oraz zawartość powietrza - klasa betonu C20/25



Rys. 2. Wpływ rodzaju i zawartości mączki na wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach pielęgnacji



Rys. 3. Wpływ rodzaju i zawartości mączki na głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

#### 4.2. Etap 2 badań

Na podstawie wyników uzyskanych w etapie 1 wytypowano trzy mączki wapienne: C, D oraz H wykazujące najwyższą stabilność parametrów oraz najlepszą kompatybilność z cementem CEM I. W oparciu o te dodatki przeprowadzono pełny zakres badań wstępnych, zgodnie z wymaganiami załącznika A normy PN-EN 206 [13].

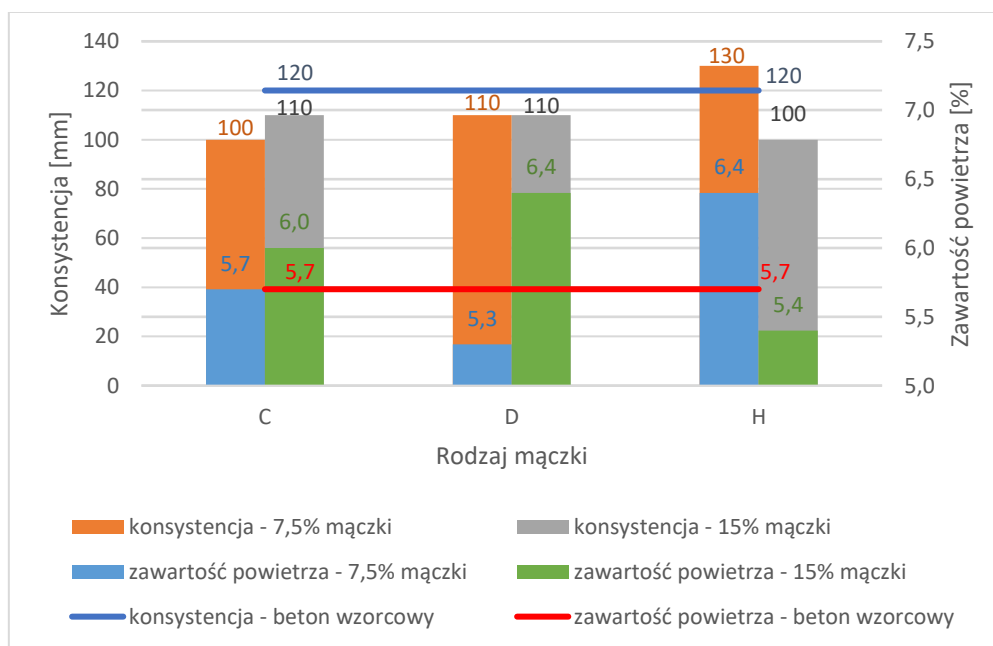
W ramach dwuetapowego programu badawczego mączki C, D i H poddano szczegółowej analizie technologicznej i materiałowej. Ich charakterystyka fizyczna, obejmująca uziarnienie i pochodzenie geologiczne, została zestawiona w tabeli 3. Zróżnicowanie stopnia rozdrobnienia oraz rodzaju surowca pierwotnego może mieć istotny wpływ na właściwości reologiczne mieszanki betonowej, jak również na mikrostrukturę i parametry wytrzymałościowe betonu stwardniałego.

Tab. 3. Uziarnienie badanych mączek oraz ich pochodzenie geologiczne

| Uziarnienie [mm] | Rodzaj mączki [%] |      |       |
|------------------|-------------------|------|-------|
|                  | C                 | D    | H     |
| 2.000            | 100               | 100  | 100   |
| 0.125            | 90                | 97   | 97    |
| 0.063            | 82                | 90   | 85    |
| Pochodzenie      | Dewon/Jura        | Jura | Dewon |

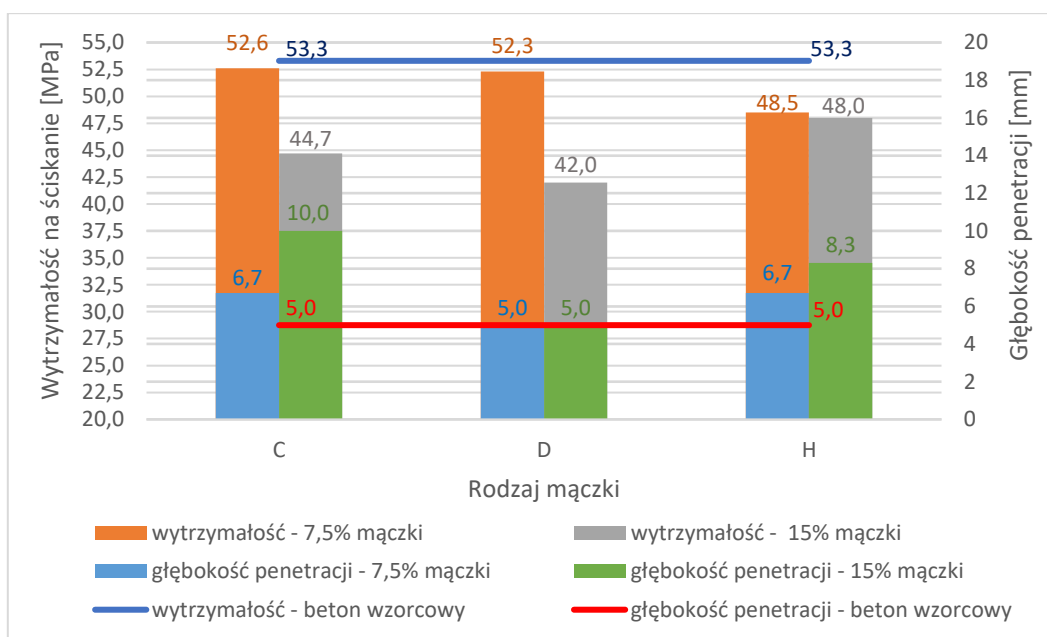
Wszystkie analizowane mączki wapienne charakteryzowały się pełnym przejściem przez sito o oczku 2 mm, jednak różniły się udziałem najdrobniejszej frakcji (<0,063 mm). Największy udział tej frakcji odnotowano dla mączki D (90%), natomiast najmniejszy dla mączki C (82%). Różnice w uziarnieniu mogą wpływać na efektywność wypełniania przestrzeni porowej w matrycy cementowej, a tym samym na szczelność betonu oraz wodożądność mieszanki. Istotne znaczenie może mieć również pochodzenie geologiczne surowca: Jura, Devon lub ich kombinacja (Devon/Jura), które determinują mineralogiczny skład mączki m.in. zawartość kalcytu i dolomitu wpływając tym samym na właściwości reologiczne mieszanki oraz trwałość betonu. Charakterystyka geologiczna i znajomość parametrów fizycznych pozwala określić potencjalny wpływ tych dodatków na kluczowe właściwości technologiczne: konsystencję, napowietrzenie oraz szczelność struktury betonu.

Badania mieszanki betonowej klasy C30/37 (rys. 4) nie wykazały negatywnego wpływu zastosowanych mączek wapiennych na urabialność mieszanki ani na możliwość uzyskania stabilnego napowietrzenia, niezbędnego w betonach mrozoodpornych.



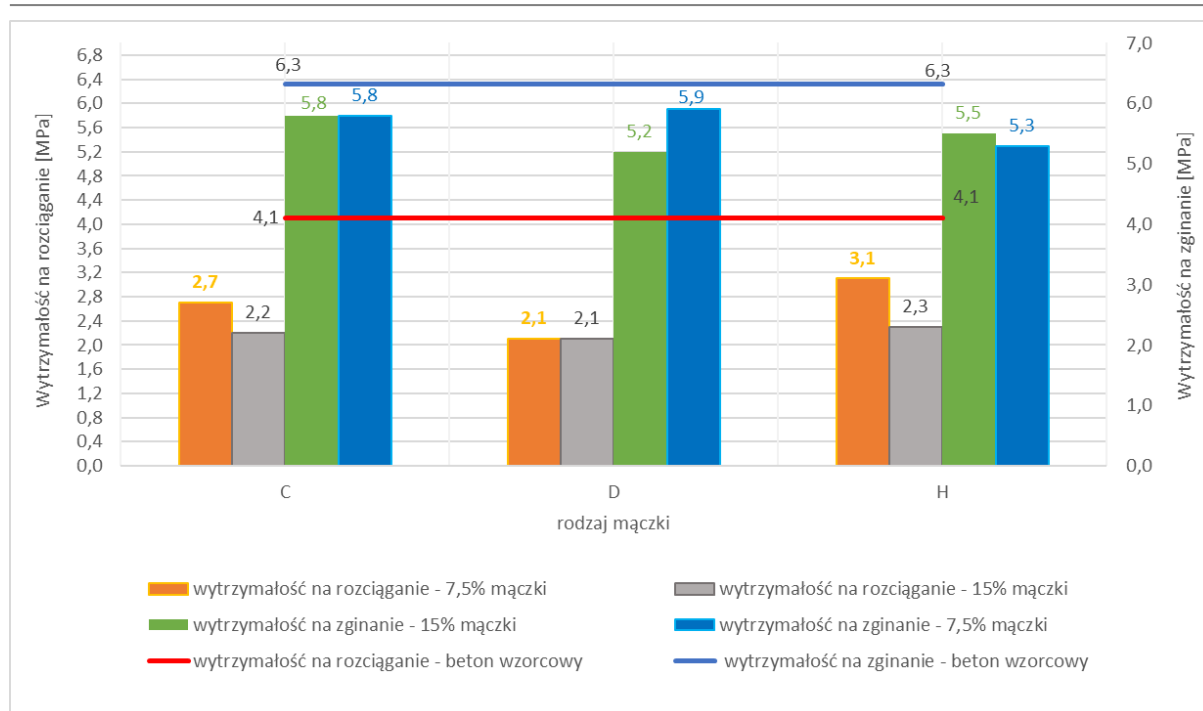
Rys. 4. Wpływ rodzaju i zawartości mączki na konsystencję mieszanki betonowej oraz zawartość powietrza - klasa betonu C30/37

Wytrzymałość na ściskanie (rys. 5) uległa jedynie nieznacznemu obniżeniu przy dozowaniu mączki wapiennej na poziomie 7,5% masy cementu, spadek ten był pomijalny z punktu widzenia oceny zgodności receptury. Nawet przy zwiększeniu udziału mączki do 15%, wszystkie próbki spełniły wymagania dla klasy wytrzymałości C30/37, co jednoznacznie potwierdza możliwość zastosowania wytypowanych mączek wapiennych w projektowaniu betonów konstrukcyjnych.



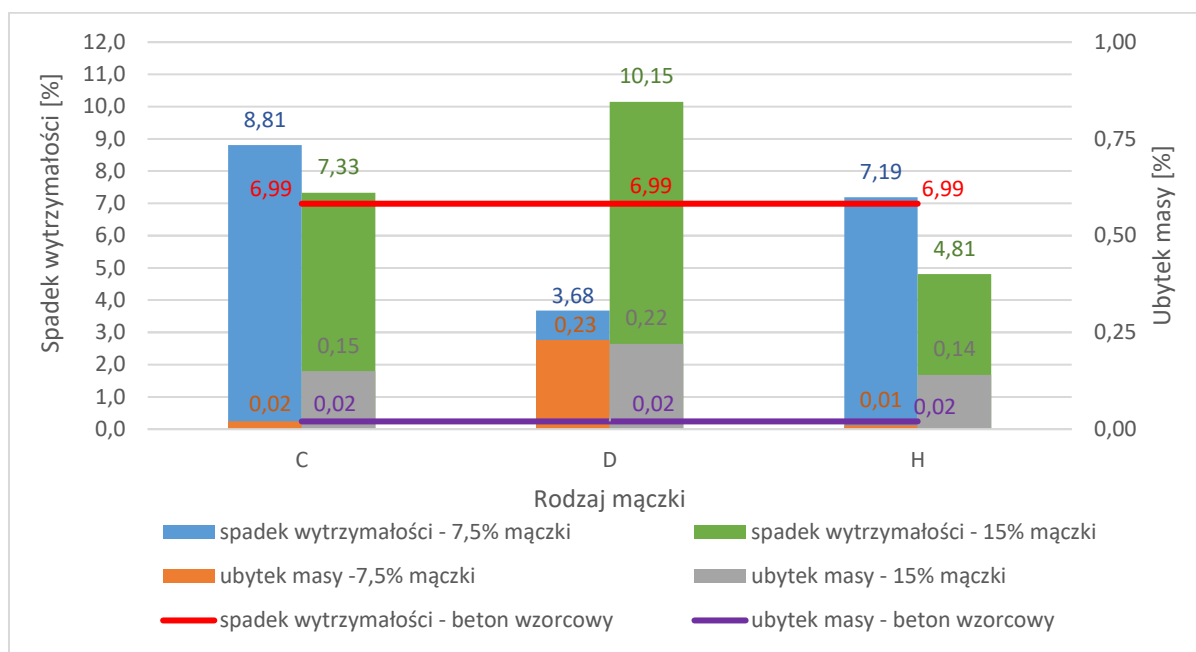
Rys. 5. Wpływ rodzaju i zawartości mączki na wytrzymałość betonu na ściskanie oraz głębokość penetracji wody pod ciśnieniem po 28 dniach pielęgnacji - klasa betonu C30/37

W przypadku wytrzymałości na zginanie i rozciąganie (rys. 6), mieszanki zawierające mączki wapienne wykazywały nieznaczne obniżenie wartości, przy czym efekt ten był bardziej zauważalny w przypadku rozciągania. Ponieważ jednak właściwości te nie zostały określone w pierwotnym projekcie betonu wzorcowego, ich ocena powinna być każdorazowo uzależniona od wymagań i specyfikacji technicznej zamawiającego. W praktyce może to mieć znaczenie przede wszystkim w elementach konstrukcyjnych narażonych na działanie sił rozciągających, takich jak belki zginane, płyty, nawierzchnie drogowe czy elementy prefabrykowane, gdzie spadek wytrzymałości na rozciąganie może wpływać na podatność na zarysowanie lub zmniejszenie nośności. W takich przypadkach wskazane jest rozważenie dodatkowego zbrojenia lub modyfikacji receptury.



Rys. 6. Wytrzymałość na zginanie oraz wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu (beton klasy C30/37)

Badania odporności na penetrację wody oraz cykliczne zamrażanie i rozmrażanie (rys. 5 i 7) wykazały, że zastosowanie mączek wapiennych nie prowadzi do pogorszenia właściwości trwałościowych betonu. Uzyskane wyniki spełniają wymagania normowe dla betonu klasy C30/37, przeznaczonego do pracy w warunkach ekspozycji XC4, co potwierdza możliwość ich bezpiecznego stosowania w konstrukcjach narażonych na działanie cyklicznie zmiennych warunków wilgotnościowych i temperaturowych.



Rys. 7. Wpływ rodzaju i zawartości mączki na spadek wytrzymałości betonu oraz na ubytek masy próbek po badaniu odporności na działanie mrozu w stopniu F150 - klasa betonu C30/37

## 5. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzony dwuetapowy program badawczy jednoznacznie potwierdza możliwość wykorzystania wybranych dostępnych na rynku mączek wapiennych (gotowych produktów) jako funkcjonalnych składników w recepturach betonu zwykłego. Wnioski te opierają się na poniższych obserwacjach:

- Zastąpienie reaktywnego dodatku pucolanowego (popiołu lotnego) przez mączkę wapienną typu I (chemicznie niemal obojętną) skutkuje umiarkowanym spadkiem wytrzymałości na ściskanie. Nawet przy wysokim udziale (do 33% masy cementu), odpowiadającemu całkowitemu zastąpieniu popiołu, zaobserwowano jedynie kilkuprocentowe obniżenie parametrów mechanicznych. W przypadku częściowego zastąpienia cementu CEM I (7,5–15%), mieszanki spełniały wymagania założonej klasy C30/37.
- Charakterystyki uziarnienia i pochodzenia geologicznego mączek wapiennych (np. Jura, Devon) mają istotny wpływ na właściwości reologiczne oraz napowietrzenie mieszanki betonowej. W niższych klasach betonu (C12/15, C20/25) obserwowano wyraźniejszy efekt niekontrolowanego napowietrzenia, natomiast w betonie klasy C30/37, celowo napowietrzanym, wpływ ten był marginalny. Wodożądność mączek była zbliżona do popiołu lotnego, co pozwalało na utrzymanie stałego wskaźnika w/c bez konieczności korekty ilości wody zarobowej.
- Wyniki badań głębokości penetracji wody wykazały, że mączki wapienne nie poprawiają szczelności struktury betonu w takim stopniu, jak aktywne dodatki mineralne. Mimo to, uzyskane wartości mieściły się w granicach wymagań dla klasy

ekspozycji XA3, co umożliwia ich stosowanie w środowiskach agresywnych, przy odpowiednim dostosowaniu składu betonu.

- Warunkiem dopuszczenia danej mączki wapiennej do stosowania w betonie jest przeprowadzenie pełnego zakresu badań wstępnych zgodnie z załącznikiem A normy PN-EN 206 [13]. Procedura ta umożliwia ocenę zgodności właściwości użytkowych mieszanki z wymaganiami normowymi oraz weryfikację kompatybilności składników z cementem.
- W badaniach trwałościowych (odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie, penetracja wody pod ciśnieniem) nie odnotowano negatywnego wpływu mączek wapiennych. W zakresie właściwości mechanicznych odnotowano jedynie obniżenie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, co wskazuje, że parametr ten powinien być uwzględniony przy doborze betonu do konkretnych zastosowań konstrukcyjnych.
- Zastosowanie mączek wapiennych wpisuje się w strategię dekarbonizacji budownictwa i dążenie do zrównoważonego rozwoju. Ograniczenie ilości klinkieru w mieszance betonowej pozwala na realną redukcję emisji CO<sub>2</sub>, co jest zgodne z ideą modelu 5C (Clinker–Cement–Concrete–Construction–Carbonation), promowanego m.in. przez Giergiczego i współautorów [7,10].
- Mączki wapienne mogą pełnić funkcję alternatywy w odniesieniu do dodatków mineralnych pochodzenia przemysłowego, takich jak popiół lotny i granulowany żużel wielkopiecowy, których dostępność maleje w związku z transformacją sektora energetycznego i hutnictwa. Jako produkt uboczny przetwórstwa wapieni, mączki te stanowią cenny surowiec wtórny o potencjale zastosowania w nowoczesnych, niskoemisyjnych technologiach betonowych.

Powyższe obserwacje są zgodne z wynikami wcześniejszych badań Giergiczego [7,10], który wskazywał, że drobno zmielone mączki wapienne mogą pozytywnie wpływać na strukturę matrycy cementowej, poprawiać jej szczelność i trwałość oraz działać jako efektywne mikro-wypełniacze i zarodki krystalizacji faz C–S–H.

Niniejszy artykuł powstał z inicjatywy prof. Grzegorza Bajorka, pracownika Politechniki Rzeszowskiej oraz Centrum Technologicznego Budownictwa – Instytutu Badań i Certyfikacji. Profesor G. Bajorek odegrał kluczową rolę w zaprojektowaniu programu badawczego oraz określeniu jego celów aplikacyjnych. Współautorzy artykułu składają wyrazy uznania i wdzięczności za jego wkład merytoryczny i inspirację naukową.

## Literatura

- [1] K. De Weerd, SINTEF REPORT, [https://www.sintef.no/globalassets/sintef-byggforsk/coin/sintef-reports/sbf-bk-a07023\\_ternary-blended-cements-with-fly-ash-and-limestone-a.pdf](https://www.sintef.no/globalassets/sintef-byggforsk/coin/sintef-reports/sbf-bk-a07023_ternary-blended-cements-with-fly-ash-and-limestone-a.pdf), dostęp: 17.06.2025
- [2] M. A. Tarabishi, partially replacing fly ash with limestone powder in concrete – an experimental study, [https://etd.ohiolink.edu/acprod/odb\\_etd/ws/send\\_file/send?accession=csu1643196612002884&disposition=inline#:~:text=has%20gained%20interest%20in%20research,for%20fly%20ash%20in%20light](https://etd.ohiolink.edu/acprod/odb_etd/ws/send_file/send?accession=csu1643196612002884&disposition=inline#:~:text=has%20gained%20interest%20in%20research,for%20fly%20ash%20in%20light), dostęp: 17.06.2025
- [3] M. Hassan, Influence of limestone powder and fly ash on the freezing and thawing resistance of roller-compacted concrete. 2021, KSCE Journal of Civil Engineering, <https://doi.org/10.1007/S12205-021-1457-Z>
- [4] S.H. Liu, Z.Y. Gao, M.J. Rao, Study on ultra-high performance concrete containing limestone powder. 2011, Advanced Materials Research, 250-253:686-689, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.686
- [5] P.P. Li, H.J.H. Brouwers, H.J.H. W. Chen, Q. Yu, Optimization and characterization of high-volume limestone powder in sustainable ultra-high performance concrete. 2020, Construction and Building Materials, 242:118112, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.118112
- [6] J. Zheng, G. Liu, The influence and application of slag, fly ash, and limestone flour on compressive strength of concrete based on the concrete compressive strength development over time (CCSDOT) Model. 2020, Applied Sciences, 10(10), 3572, doi.org/10.3390/app10103572
- [7] M. Piechówka, Z. Giergiczny, Wpływ kamienia wapiennego na właściwości reologiczne zaczynu cementowego. 2011, Budownictwo Technologie Architektura, 1/2011, s. 58-61
- [8] D.P. Bentz, E.F. Irassar, B.E. Bucher, W.J. Weiss, Limestone fillers conserve cement. 2009, ACI Concrete International 31(12):35-39
- [9] P. Górak, P. Mofina, Ł. Guzikowski, Zielony potencjał cementu wapiennego w aspekcie redukcji śladu węglowego wbudowanego w konstrukcjach mostowych. 2022, Materiały Budowlane, 10/2022, s. 110-113, DOI: 10.15199/33.2022.10.27
- [10] Z. Giergiczny, Rola wapienia w kształtowaniu właściwości kompozytów cementowych. Go Green Concrete Sympozjum, Reologia w Technologii Betonów Niskoemisyjnych, Wrocław 2022
- [11] CRH Materials Polska/Cement Ożarów, Holistyczne podejście 5C do redukcji emisji branży cementowej i betonowej, BTA, [https://www.bta-czasopismo.pl/wp-content/uploads/2025/02/52\\_Holistyczne-podejscie-5C-do-redukcji-emisji-branzy-cementowej-i-betonowej.pdf](https://www.bta-czasopismo.pl/wp-content/uploads/2025/02/52_Holistyczne-podejscie-5C-do-redukcji-emisji-branzy-cementowej-i-betonowej.pdf) dostęp: 17.06.2025
- [12] B. Langier, J. Halbiniak, I. Major, Analysis of the use of recycled limestone flour for cement-lime binders and mortars. 2024, Materiały Budowlane, 11/2024, s.46-54. DOI: 10.15199/33.2024.11.06

- [13] PN-EN 206+A2:2021-08 Beton. Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja zgodność
- [14] PN-EN 450-1:2012 Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności
- [15] PN-EN 13263-1+A1:2010 Pył krzemionkowy do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności
- [16] PN-EN 15167-1:2007 Mielony granulowany żużel wielkopiecowy do stosowania w betonie, zaprawie i zaczynie. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności
- [17] PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu
- [18] Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych M-13.01.00 v04, Beton konstrukcyjny w drogowych obiektach inżynierskich, Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa, sierpień 2022

XIII  
KONFERENCJA

# DNI BETONU 2025

13-15 października 2025



## PARTNERZY PROGRAMOWI



## SPONSORZY / FIRMY



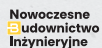
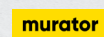
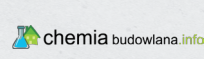
## PATRONAT MEDIALNY



www.bta-czasopismo.pl



## WSPÓŁPRACA MEDIALNA



## ORGANIZATOR



Stowarzyszenie Producentów Cementu

30-003 Kraków • ul. Lubelska 29 • tel.: +48-12-423-33-55

biuro@polskicement.pl • dnibetonu@polskicement.pl

www.polskicement.pl

Bądź z nami w kontakcie:

www.facebook.com/PolskiCement

www.facebook.com/ArchitekturaBetonowa

x.com/polskicement

www.instagram.com/architektura\_betonowa



ISBN: 978-83-61331-51-3