

XIII
KONFERENCJA

2025 DNI BETONU

TRADYCJA I NOWOCZESNOŚĆ

13-15 października 2025

MONOGRAFIE TECHNOLOGII BETONU - REFERATY



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
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

BETON TOWAROWY

READYMIX CONCRETE

mgr inż. Krzysztof Żółtek
ŻANEX SP. Z O. O.

**Wybrane wyniki badań projektu POIR.01.01.01-00-0825/18 pt.
„Opracowanie innowacyjnego systemu do zarządzania jakością
płynnego betonu podczas transportu”**

Selected research results of the project POIR.01.01.01-00-0825/18 entitled
"Development of an innovative system for managing the quality of liquid concrete
during transport"

Streszczenie

Od 2019 roku do 2022 roku firma Żanex Sp. z o.o. przeprowadziła prace badawczo rozwojowe pt. „Opracowanie innowacyjnego systemu do zarządzania jakością płynnego betonu podczas transportu.”. Celem projektu jest opracowanie systemu zarządzania jakością mieszanki betonowej w trakcie transportu, gdzie głównym zadaniem jest pomiar konsystencji mieszanki betonowej oraz objętościowej zawartość powietrza. Najlepsze rezultaty pomiaru konsystencji mieszanki betonowej uzyskano za pomocą sensora dokonującego pomiaru wychylenia mieszanki betonowej w trakcie jednostajnego obrotu bębna betonowozu, a objętościowej zawartości powietrza za pomocą sensora dokonującego pomiaru amplitudy fali wibroakustycznej propagowanej przez mieszankę betonową.

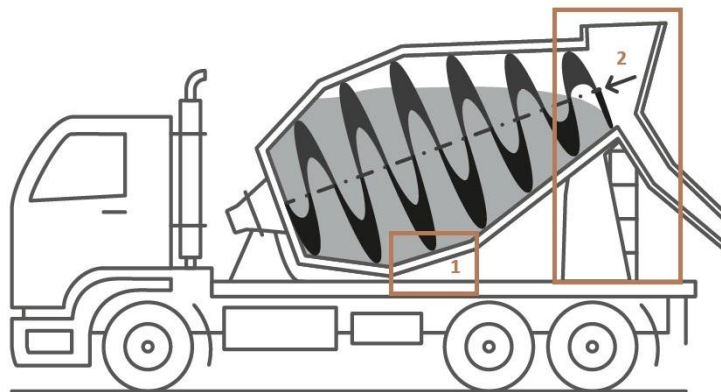
Abstract

From 2019 to 2022, Żanex Sp. z o.o. conducted research and development work entitled "Development of an innovative system for managing the quality of liquid concrete during transport." The project aims to develop a system for managing the quality of concrete mix during transport, whose main task is to measure the consistency of the concrete mix and its volumetric air content. The best results for measuring the consistency of the concrete mix were obtained using a sensor measuring the deflection of the concrete mix during the uniform rotation of the concrete mixer drum, and for measuring the volumetric air content using a sensor measuring the amplitude of the vibroacoustic wave propagated by the concrete mix.

1. O projekcie

W latach od 2019 do 2022 przeprowadzono prace badawczo rozwojowe pt. „Opracowanie innowacyjnego systemu do zarządzania jakością płynnego betonu podczas transportu.”. Wykonano prace badawcze, których celem jest zaprojektowanie, wykonanie i udoskonalenie poszczególnych elementów systemu, który znajdzie zastosowanie w branży budowlano - betoniarskiej.

Idąc naprzeciw oczekiwaniom przemysłu planowano stworzyć system do zarządzania jakością mieszanki betonowej podczas transportu. System składa się z urządzenia pomiarowego znajdującego się na bębnie betonowozu w miejscu istniejącego wjazdu oraz automatyki dozującej płynne dodatki do betonu i elektroniki pomocniczej. Na rys 1.1 przedstawiono schemat systemu, gdzie nr 1 oznaczono lokalizację urządzenia pomiarowego, a nr 2 urządzenia dozującego.



Rys. 1.1 Schemat systemu.

Celem urządzenia pomiarowego, jest pośrednie badanie objętościowej zawartości powietrza oraz konsystencji mieszanki betonowej, zaś celem urządzenia dozującego jest utrzymywanie jej parametrów lub w miarę możliwości wyregulowanie ich do parametrów zadanych przez operatora poprzez dolewanie plastyfikatorów.

W rezultacie przeprowadzonych prac badawczo rozwojowych pierwotne założenia projektu wielokrotnie zostały zmienione, aby znaleźć takie pośrednie parametry mieszanki betonowej, aby móc określić konsystencję płynnej mieszanki betonowej jako ekwiwalent odpowiednich wartości normowych konsystencji takich jak opad stożka Abramsa.

Mieszalnik podczas transportu obraca się z małą prędkością, mając na celu tylko zapobieżenie zagęszczeniu się mieszanki betonowej. W pewnym zakresie ruch obrotowy mieszalnika ze względu na działanie sensora jest korzystny ponieważ przepływ betonu wymusza homogenizację badanej mieszanki betonowej, a co za tym idzie średni wynik pomiarów jest możliwie najbliższy rzeczywistości. Z drugiej zaś strony powoduje on relatywnie szybką eksploatację elementów sensora.

Pomiar parametrów mieszanki betonowej jest tylko częścią opracowywanego systemu zarządzania jakością. W przypadku, wystąpienia warunku odpowiednio dokładnego pomiaru parametrów mieszanki betonowej system ma za zadanie je regulować w czasie transportu poprzez dozowanie plastyfikatorów.

2. Badania pomocnicze

2.1. Badania pomiaru impedancji elektrycznej

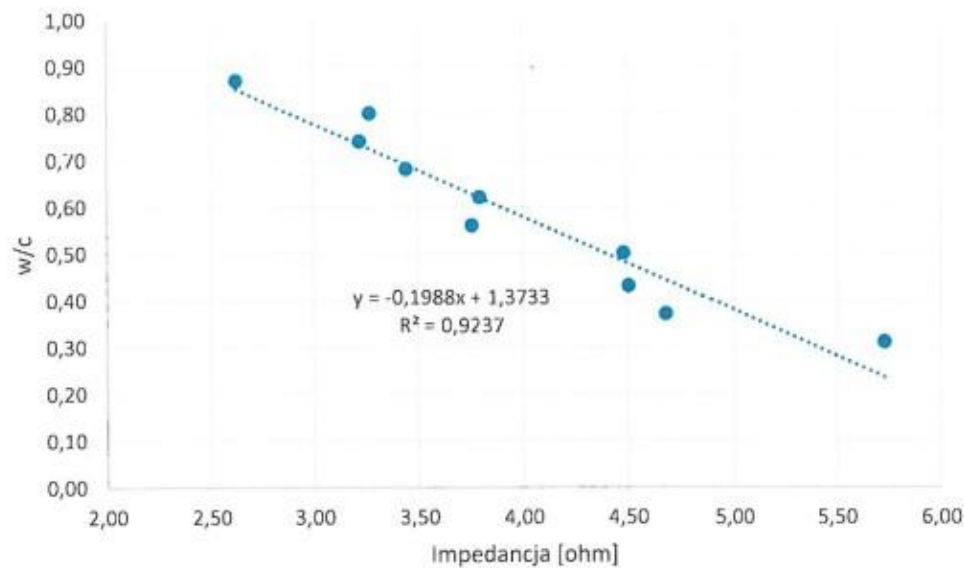
Pierwotnie planowano dokonywać pomiaru rezystancji elektrycznej mieszanki betonowej celem określania stosunku w/c oraz zawartości kruszyw. Znacznie lepszym rozwiązaniem okazało się dokonywanie pomiaru impedancji elektrycznej mieszanki betonowej. Pomiar rezystancji dla prądu stałego powoduje nasilenie się zjawisk elektrochemicznych zachodzących na elektrodach, co w rezultacie powoduje obniżenie współczynnika determinacji otrzymanych wyników. Celem zminimalizowania tych zjawisk należy zastosować prąd zmienny do badań. Zastosowanie prądu zmiennego sprawia, że naprzemiennie zmieniają się bieguny na elektrodach, to sprawia, że poprzez okresową zmianę biegunowości okresowo zmienia się również kierunek tych reakcji, dzięki czemu ich skutki w mniejszym stopniu wpływają na jakość pomiarów.

Kolejnym elementem negatywnie wpływającym na intensywność zjawisk elektrochemicznych jest wartość natężenia prądu elektrycznego. Wraz ze wzrostem natężenia prądu wzrasta intensywność zjawisk elektrochemicznych, z drugiej zaś strony wraz z malejącym natężeniem prądu elektrycznego istnieje trudność w jego pomiarze. Występuje wiele innych kluczowych elementów pomiaru impedancji elektrycznej mieszanki betonowej oraz czystego zaczynu cementowego takie jak: materiał elektrod, dynamika metody badawczej, geometria elektrod oraz stan zużycia elektrod, które wpływają na jakość wyników badań.

W początkowej fazie dokonywano wielu optymalizacji celem uzyskania możliwie najwyższej powtarzalności. W badaniach laboratoryjnych mieszanka betonowa była statyczna, a w badaniach w warunkach zbliżonych do rzeczywistych mieszanka była ruchoma. Badania w warunkach zbliżonych do rzeczywistych odbyły się w stacjonarnym betonowie. Jednostajny ruch mieszalnika powoduje poprawę jakości wyników badań. Prawdopodobnie spowodowane jest to wspomnianymi wcześniej zjawiskami elektrochemicznymi, które wpływają na reakcje chemiczne mieszanki betonowej w warstwie przyściennej. Ruch powoduje, że ta mieszanka jest non stop wymieniana, co poprawia jakość wyników badań.

Należy również zaznaczyć, że dokonywano pomiaru parametrów elektrycznych zarówno zaczynu cementowego jak i mieszanki betonowej. Elektrody służące do pomiaru impedancji elektrycznej zaczynu cementowego charakteryzowały się położeniem na jednej płaszczyźnie w odległości rzędu milimetrów od siebie, zaś elektrody do pomiaru impedancji elektrycznej mieszanki betonowej znajdowały się najczęściej naprzeciw siebie w odległościach rzędu kilkunastu centymetrów od siebie. Dokonywano również pomiarów impedancji elektrycznej czystego zaczynu cementowego.

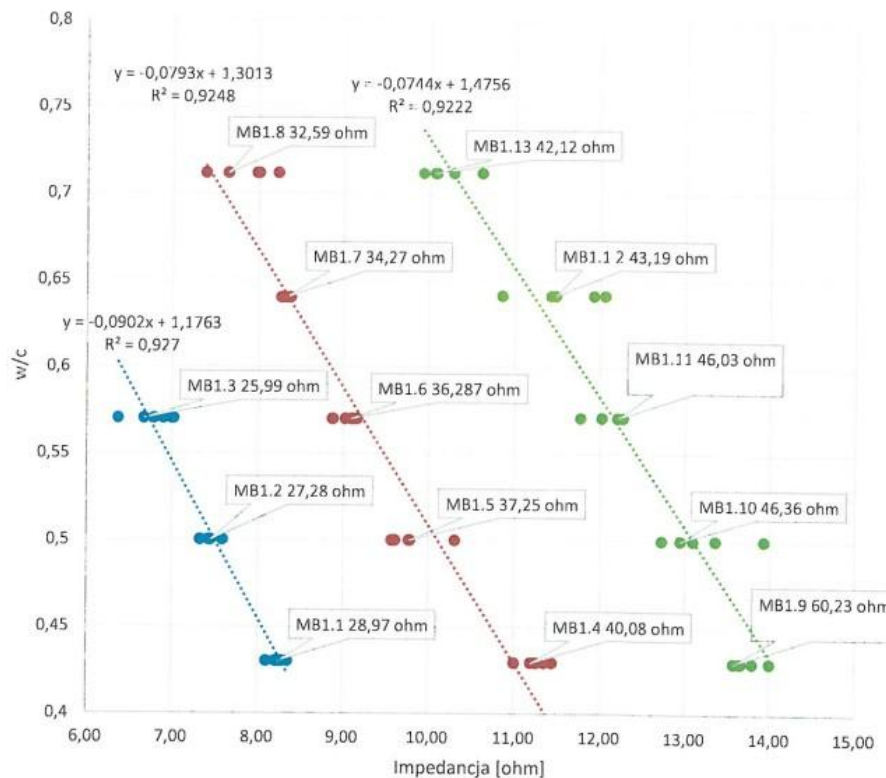
Poniżej przedstawiono wyniki badań dla zoptymalizowanych parametrów celem minimalizacji ww. zjawisk. Na Rys. 2.1 przedstawiono wyniki badań impedancji elektrycznej czystego zaczynu cementowego w zakresie jednego rodzaju cementu



Rys. 2.1. Wyniki badań impedancji elektrycznej czystego zaczynu cementowego.

W zakresie jednego rodzaju cementu zależność pomiędzy impedancją elektryczną a stosunkiem w/c osiąga współczynnik determinacji nieznacznie powyżej 0,9.

Na rys 2.2 przedstawiono wyniki badań impedancji elektrycznej dla zoptymalizowanych parametrów pomiaru za pomocą urządzenia laboratoryjnego, dla różnych składów mieszanek betonowych, gdzie zmienną była zawartość kruszyw oraz w/c. Badania wykonano dla napięcia 1V oraz dla częstotliwości 10 kHz.



Rys. 2.2 Zależność pomiędzy impedancją elektryczną zaczynu cementowego, a w/c.

W tabeli 2.1 przedstawiono skład mieszanek betonowych, dla których przedstawiono wyniki.

Tabela 2.1 Skład użytych mieszanek betonowych.

Mieszanka	CEM I 42,5 [kg]	Woda [kg]	Piasek 0÷2 [kg]	Kruszywo 2÷8 [kg]	Kruszywo 8÷16 [kg]	W/C [-]	K/C [-]	korekta zawartości kruszyw
MB1.1	7,875	3,3863	14,115	6,248	12,038	0,43	2,88	0,75
MB1.2	7,875	3,9375	14,115	6,248	12,038	0,50	2,74	0,75
MB1.3	7,875	4,4888	14,115	6,248	12,038	0,57	2,62	0,75
MB1.4	7,875	3,3863	18,820	8,330	16,050	0,43	3,84	1
MB1.5	7,875	3,9375	18,820	8,330	16,050	0,50	3,66	1
MB1.6	7,875	4,4888	18,820	8,330	16,050	0,57	3,49	1
MB1.7	7,875	5,0400	18,820	8,330	16,050	0,64	3,34	1
MB1.8	7,875	5,5913	18,820	8,330	16,050	0,71	3,21	1
MB1.9	7,875	3,3863	23,525	10,413	20,063	0,43	4,80	1,25
MB1.10	7,875	3,9375	23,525	10,413	20,063	0,50	4,57	1,25
MB1.11	7,875	4,4888	23,525	10,413	20,063	0,57	4,37	1,25
MB1.12	7,875	5,0400	23,525	10,413	20,063	0,64	4,18	1,25
MB1.13	7,875	5,5913	23,525	10,413	20,063	0,71	4,01	1,25

W zakresie jednego składu, mieszanki betonowej, gdzie zmienną jest tylko w/c zależność pomiędzy impedancją elektryczną zaczynu cementowego, a stosunkiem w/c osiąga współczynnik determinacji wynoszący około 0,92. W zakresie wszystkich mieszanek betonowych zależność ta w zasadzie nie występuje, zatem określenie w/c za pomocą impedancji elektrycznej w szerokim zakresie mieszanek betonowych prawdopodobnie jest niemożliwe. Transportowana mieszanka betonowa ma stały skład kruszyw i cementu. Porównując wartość początkową impedancji elektrycznej zaczynu cementowego do wartości impedancji zaczynu cementowego w kolejnych chwilach może dać informację, czy do danej mieszanki betonowej dodawana jest woda lub inne dodatki płynne.

Poniżej przedstawiono najważniejsze wnioski pomiaru badań impedancji elektrycznej mieszanki betonowej oraz zaczynu cementowego:

A. Ważnym elementem pomiaru impedancji elektrycznej jest zminimalizowanie zjawisk elektrochemicznych zachodzących w warstwie przyściennej elektrod, ponieważ ich intensywność znacząco wpływa na jakość badań.

B. Występuje silna zależność pomiędzy impedancją elektryczną zaczynu cementowego oraz mieszanki betonowej w zakresie jednego cementu oraz jednej receptury, a współczynnikiem w/c, dla której współczynnik determinacji wynosi powyżej 0,9.

C. Dla różnych rodzajów cementów charakterystyki pomiędzy współczynnikiem w/c, a impedancją elektryczną są różne w tak dużym stopniu, że w skrajnych przypadkach są one odwrotne.

D. Występuje silna zależność pomiędzy zawartością kruszyw w mieszance betonowej, a impedancją elektryczną mieszanki betonowej.

E. Nie tylko rodzaj cementu wpływa na wartość impedancji mieszanki betonowej, ale również dodatki do betonu wpływają na obniżenie współczynnika determinacji.

F. Potencjalnym wykorzystaniem pomiaru impedancji elektrycznej mieszanki betonowej jest względna zmiana parametrów w trakcie transportu tj. jeżeli wynik pomiaru zmiana się względem wartości początkowej to może oznaczać ingerencję w zmianę składu mieszanki betonowej np. poprzez dolewanie wody.

F. Występuje znaczna różnica impedancji mierzonej w mieszance betonowej, a impedancji mierzonej po wynurzeniu z mieszanki betonowej (w powietrzu). Właściwość tę można wykorzystać jako pomiar pomocniczy, co wykorzystano w trakcie dalszych prac.

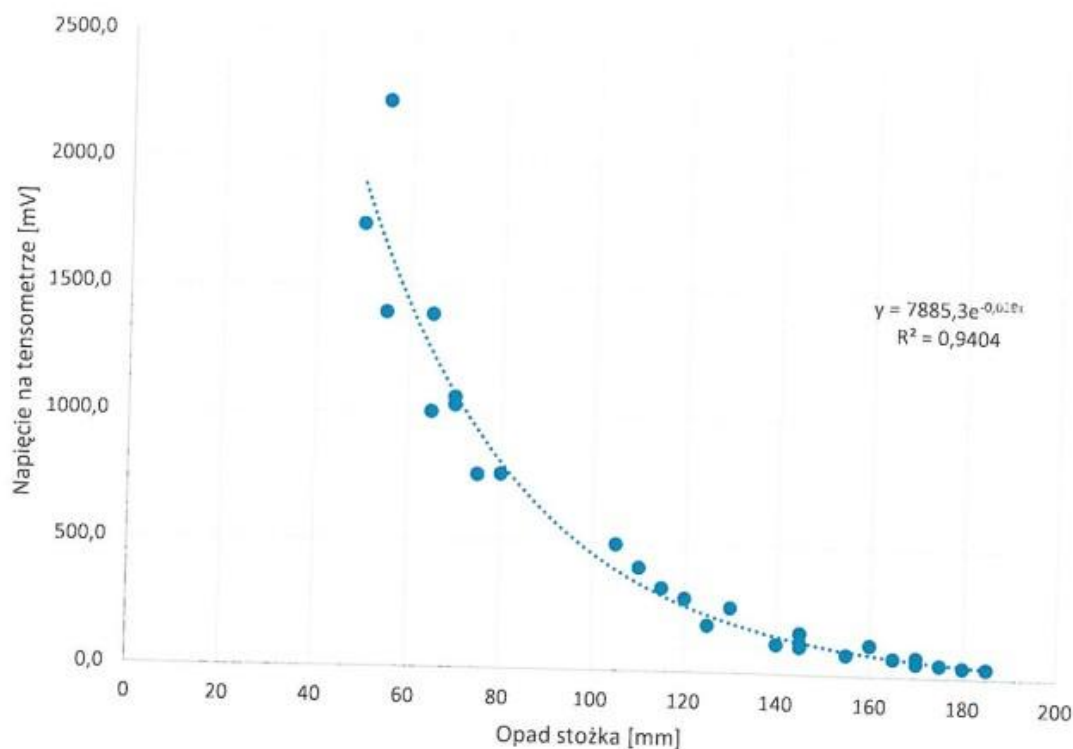
3. Badania konsystencji mieszanki betonowej

3.1. Badanie konsystencji mieszanki betonowej za pomocą tensometrycznego czujnika oporu ruchu

Na podstawie pierwotnych założeń zaprojektowano i skonstruowano czujnik, który dokonywał pomiarów oporu ruchu w mieszance betonowej za pomocą czujnika tensometrycznego. Uogólniając sensor składał się z obudowy, do której sztywno zamocowano belkę. Belka była przymocowana do bębna betonowozu w taki sposób, że posiadała stopień swobody równoległy z siłami oporu ruchu mieszanki betonowej, a siła oporu na nią działająca skoncentrowana była na tensometrze. Pozostała część obudowy posiadała pewien stopień swobodny poprzez element dylatacyjny umożliwiający ruch w pewnym zakresie, ale uszczelniający urządzenie. Badania wykonano w warunkach zbliżonych do rzeczywistych oraz w warunkach rzeczywistych.

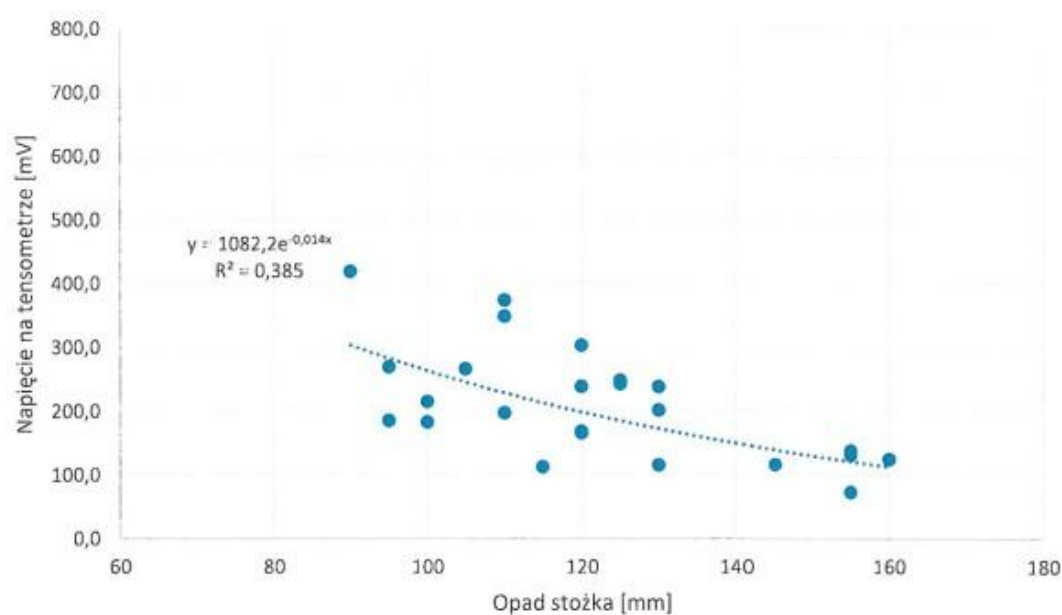
Na rys. 3.1 przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Siły oporu przedstawiono poprzez napięcie na wyjściu z sensora tj. po wzmocnieniu oraz korekcie temperaturowej.

W warunkach zbliżonych do rzeczywistych współczynnik determinacji wyniósł około 0,94.



Rys. 3.1 Zależność pomiędzy siłami oporu ruchu, a konsystencją mieszanki betonowej w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

Na rys. 3.2 przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w warunkach rzeczywistych.

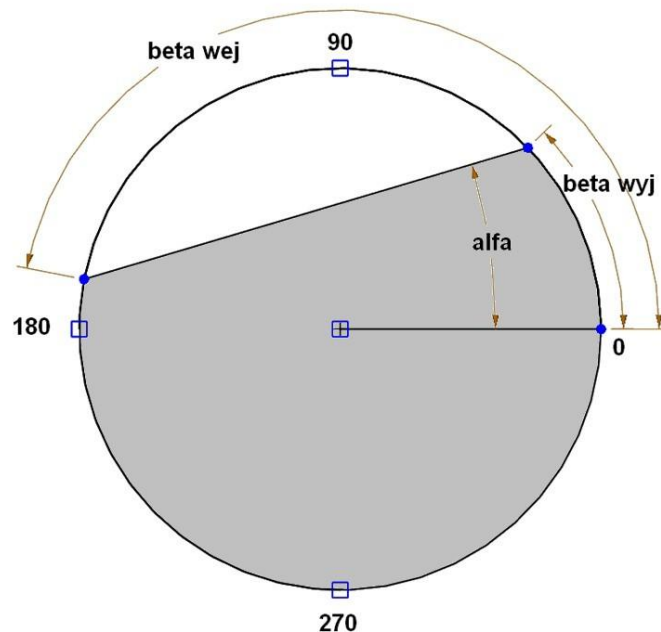


Rys. 3.2 Zależność pomiędzy siłami oporu ruchu, a konsystencją mieszanki betonowej w warunkach rzeczywistych.

W warunkach rzeczywistych współczynnik determinacji wyniósł poniżej 0,4. Głównym powodem obniżenia współczynnika determinacji w warunkach rzeczywistych okazały się między innymi: naturalnie powstające zabrudzenia w trakcie eksploatacji oraz szybkie zużywanie się elastycznej warstwy dylatacyjnej oraz rozszerzenie zakresu badań o większą ilość receptur mieszanek betonowych. Występuje zmienna wartość sił oporu ruchu dla mieszanek betonowych o wysokiej zawartości powietrza, w porównaniu z recepturami z niską zawartością powietrza przy stałym poziomie opadu stożka.

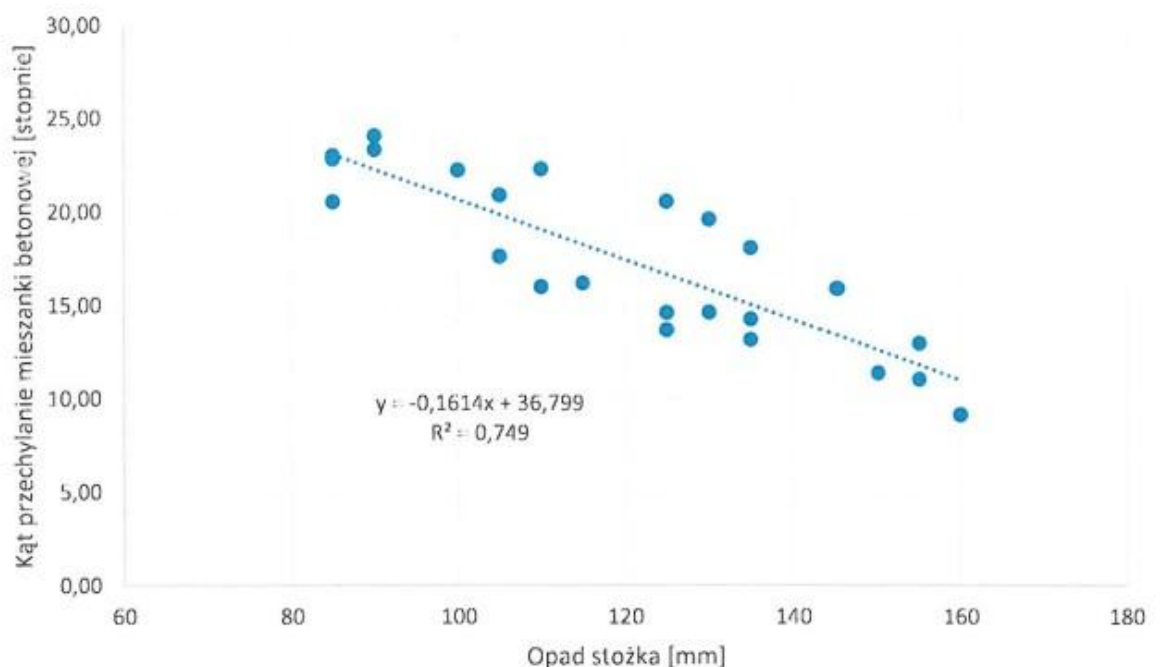
3.2. Badanie konsystencji mieszanki betonowej za pomocą czujnika pomiaru kąta wychylenia mieszanki betonowej

Ze względu iż w trakcie prac badawczych pierwotne założenie nie spełniło wymaganych oczekiwań to zmieniono koncepcję. Zaobserwowano, że dla stałej prędkości ruchu obrotowego bębna betonowozu kąt wychylenia mieszanki betonowej zmienia się wraz z konsystencją mieszanki betonowej. Kąt wychylenia mieszanki betonowej jest to kąt na jaki wychyla się mieszanka betonowa w bębnie betonowozu podczas jego jednostajnego ruchu obrotowego. Celem potwierdzenia tych spostrzeżeń wykonano badania rozpoznawcze za pomocą już skonstruowanego sensora akustycznego oraz miernika kąta obrotu bębna betonowozu. Sensor akustyczny posiada czujnik wychylenia jego membrany. Zadając sygnał wymuszający na wejściu sensora akustycznego powoduje on drgania membrany, której amplituda jest mierzona za pomocą Hallotronowego czujnika wychylenia membrany. W mieszance betonowej wychylenie to jest znacznie mniejsze, niż gdy czujnik znajduje się w powietrzu tj. jest wynurzony z mieszanki betonowej. Znając kąt obrotu bębna betonowozu w czasie oraz czas zanurzenia oraz czas wynurzenia sensora z mieszanki betonowej można wyznaczyć kąt wychylenia. Badania te potwierdziły wyżej wymienioną tezę. Wraz ze wzrostem konsystencji mieszanki betonowej maleje kąt wychylenia mieszanki betonowej. Na Rys. 3.3 przedstawiono schemat obrazujący badane wartości.



Rys. 3.3 Schemat geometryczny pomiaru kąta wychylenia mieszanki betonowej w trakcie jednostajnego ruchu obrotowego bębna betonowozu.

Zaprojektowano i wykonano sensor, który dokonywał tych pomiarów automatycznie. Sensor składał się z czujnika rezystancji. Mimo iż pomiar rezystancji wcześniej okazał się nieskuteczny to w tym przypadku różnica rezystancji elektrycznej mierzonej w mieszance betonowej, a mierzonej poza nią tj. w powietrzu jest na tyle duża, że nie jest konieczne zastosowanie rozwiązań minimalizujących reakcje elektrochemiczne, a w każdym wypadku nie na tyle jak w przypadku precyzyjnych pomiarów impedancji elektrycznej mieszanki betonowej oraz zaczynu cementowego. W tym przypadku jest wręcz przeciwnie ponieważ dokonanie pomiaru rezystancji jest szybsze niż dokonanie precyzyjnego pomiaru impedancji. Pierwotnie pomiar kąta położenia kąтового mieszalnika betonowozu pierwotnie dokonano za pomocą przyspieszeniomierzy. Ze względu, iż pomiar kąta obrotu mieszalnika betonowozu w tym przypadku nie był wystarczająco precyzyjny to dokonano zmian w sensorze. Celem precyzyjniejszego pomiaru położenia kąтового mieszalnika betonowozu wyposażono sensor w hallotronowy czujnik pomiaru kąta mieszalnika betonowozu. Czujnik ten składa się z hallotronu oraz obrotowego bębna na krawędzi, którego umiejscowiono naprzemiennie biegunami magnesy neodymowe. Po udoskonaleniu czujnika uzyskano dobry współczynnik determinacji zarówno w warunkach zbliżonych do rzeczywistych oraz w warunkach rzeczywistych, ale w bardzo wąskim zakresie objętościowej zawartości powietrza. Na rys 3.4 przedstawiono wyniki badań kąta wychylenia mieszanki betonowej w zależności od opadu stożka w warunkach rzeczywistych dla mieszanek betonowych w szerokim zakresie objętościowej zawartości powietrza.



Rys. 3.4 Zależność pomiędzy kątem wychylenia mieszanki betonowej, a opadem stożka Abramsa.

Współczynnik determinacji pomiędzy kątem wychylenia mieszanki betonowej oraz opadem stożka wyniósł około 0,75. Opory ruchu w mieszance betonowej zależne są również od objętościowej zawartości powietrza w mieszance betonowej. Mając dwie mieszanki betonowe o takim samym opadzie stożka, ale o znacznie różnej objętościowej zawartości powietrza to ta mieszanka, która zawiera więcej powietrza posiada znacznie mniejsze opory ruchu. W przypadku, gdy skorelowano kąt wychylenia mieszanki betonowej wraz z opadem stożka oraz uwzględniono poprawkę na objętościową zawartość powietrza mierzoną za pomocą urządzenia dedykowanego jakim jest porozymetr to współczynnik determinacji wyniósł około 0,95. Mieszanka betonowa o wysokiej zawartości powietrza przypomina trochę sztywną bitą śmietanę, lecz o znacznie większej gęstości. Zatem można poprawić współczynnik determinacji zależności kąta wychylenia, a konsystencji znając objętościową zawartość powietrza.

Z powodu powyższego wraz ze spadkiem współczynnika determinacji pomiaru objętościowej zawartości powietrza za pomocą opracowywanej metody maleje również współczynnik determinacji pomiaru konsystencji mieszanki betonowej, który został za jej pomocą skorygowany. Niemniej możliwe jest uzyskanie dobrych wyników badań w wąskim zakresie mieszanek betonowych o stałej i znanej zawartości powietrza.

Poniżej przedstawiono najważniejsze wnioski pomiaru konsystencji mieszanki betonowej:

A. Za pomocą pomiarów oporu ruchu w mieszance betonowej można wyznaczyć konsystencję mieszanki betonowej z wysokim współczynnikiem determinacji w zakresie mieszanek betonowych o zbliżonej objętościowej zawartości powietrza.

B. Elementy ruchome czujnika tensometrycznego są przyczyną, dla której czujnik ten w warunkach rzeczywistych osiąga niski współczynnik determinacji.

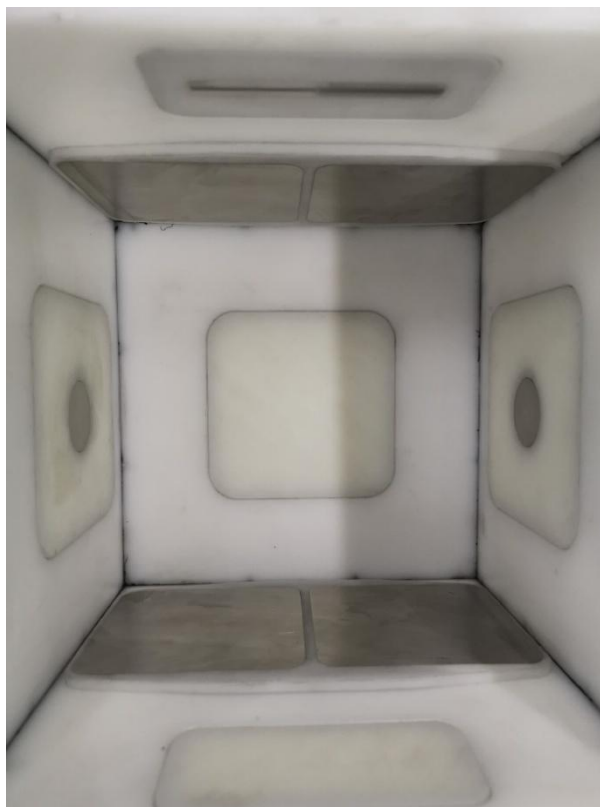
C. Za pomocą pomiaru kąta wychylenia mieszanki betonowej wykonanego przy użyciu skonstruowanego urządzenia oraz za pomocą pomiaru objętościowej zawartości powietrza mieszanki betonowej dokonanej przy użyciu porozymetru można dosyć dokładnie wyznaczyć konsystencję mieszanki betonowej wyznaczonej jako opad stożka.

4. Badania objętościowej zawartości powietrza

4.1. Badanie objętościowej zawartości powietrza w mieszance betonowej za pomocą pomiaru parametrów propagacji fal ultradźwiękowych

Pierwotnie założono, że płynna mieszanka betonowa propaguje fale ultradźwiękowe oraz, że wystąpi zależność pomiędzy parametrami propagowanej fali ultradźwiękowej, a objętościową zawartością powietrza. W pierwszej kolejności dokonano próby pomiaru fal ultradźwiękowych na odbiorniku sensora przy użyciu urządzeń laboratoryjnych. Niestety nie uzyskano sygnału na odbiorniku w szerokim zakresie parametrów ultradźwięków oraz w szerokim zakresie odległości pomiędzy odbiornikiem, a nadajnikiem. Celem dalszych prób zaprojektowano i wykonano sensor generujący ultradźwięki o znacznie większej amplitudzie sygnału, ale nawet w tym przypadku nie uzyskano sygnału.

Na Fot. 4.1 przedstawiono formę badawczą wyposażoną w czujniki ultradźwiękowe oraz zestaw elektrod do pomiaru impedancji zaczynu cementowego oraz zaczynu cementowego.



Fot 4.1 Forma badawcza zawierająca elektrody do pomiaru impedancji zaczynu cementowego (u góry) oraz mieszanki betonowej (u góry i u dołu) oraz sensory ultradźwiękowe (po prawej i po lewej)

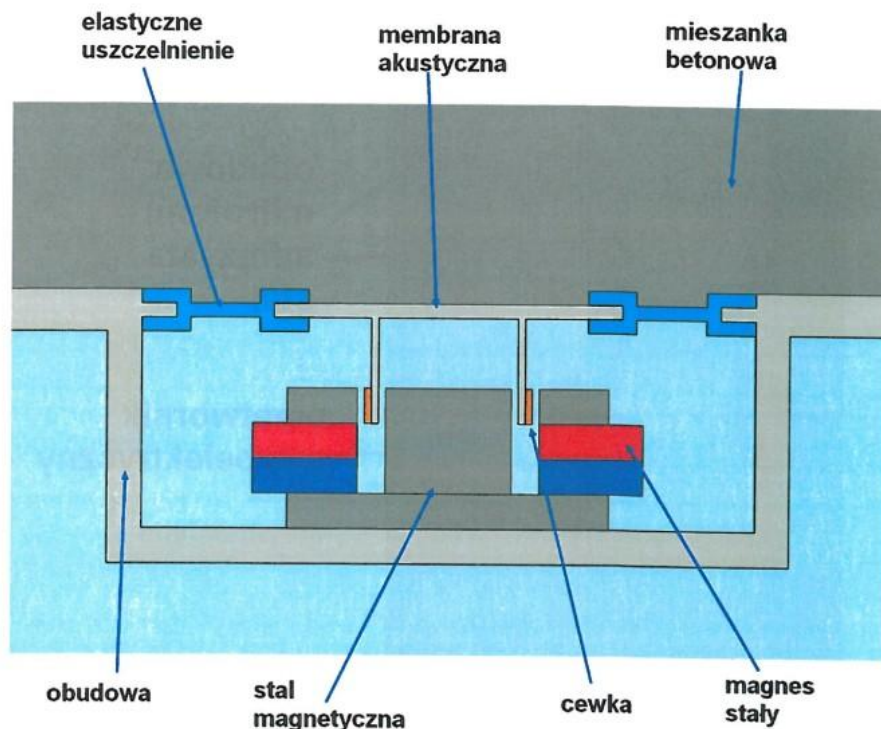
4.2. Badanie objętościowej zawartości powietrza w mieszance betonowej za pomocą pomiaru parametrów propagacji fal w zakresie słyszalnym z wykorzystaniem rozpoznawczego urządzenia laboratoryjnego

Po przeprowadzeniu badań propagacji fal ultradźwiękowych w płynnej mieszance betonowej zmieniono pierwotne założenie i dokonano pomiarów fal dźwiękowych w zakresie słyszalnym w zależności od objętościowej zawartości powietrza w mieszance betonowej, a parametrami propagowanej fali akustycznej. Ze względu iż istniało ryzyko propagacji fal akustycznych poprzez obudowę laboratoryjną, w której znajdowała się mieszanka betonowa to zaprojektowano i wykonano układ bezprzewodowy, gdzie nadajnik fal akustycznych był zanurzony swobodnie bez podpór w mieszance betonowej, a odbiornik był umiejscowiony na mieszance betonowej, a drugi odbiornik na obudowie. Takie rozwiązanie eliminowało odebranie sygnału propagowanego przez obudowę. Wyniki przeprowadzonych badań dały pozytywny rezultat. W przypadku tej konfiguracji płynna mieszanka betonowa propagowała fale akustyczne w zakresie 150-6500 Hz, gdzie maksimum występowało przy 400 - 500 Hz. Ze względu na swobodne położenie bezprzewodowego nadajnika fal dźwiękowych nie było możliwe wyznaczanie docelowych charakterystyk w zależności od objętościowej zawartości powietrza w mieszance betonowej dla tej konfiguracji.

4.3. Badanie objętościowej zawartości powietrza w mieszance betonowej za pomocą pomiaru parametrów propagacji fal w zakresie słyszalnym z wykorzystaniem docelowego urządzenia laboratoryjnego

W rezultacie przeprowadzonych badań zaprojektowano oraz wykonano sensor laboratoryjny pracujący w zakresie dźwięków słyszalnych. Na tym etapie prac głównym celem było skonstruowanie laboratoryjnego sensora wibroakustycznego za pomocą, którego możliwe będzie wykazanie zależności pomiędzy parametrami propagowanej fali wibroakustycznej przez mieszkankę betonową, a objętościową zawartością powietrza w mieszance betonowej. Sensor składa się z nadajnika oraz odbiornika.

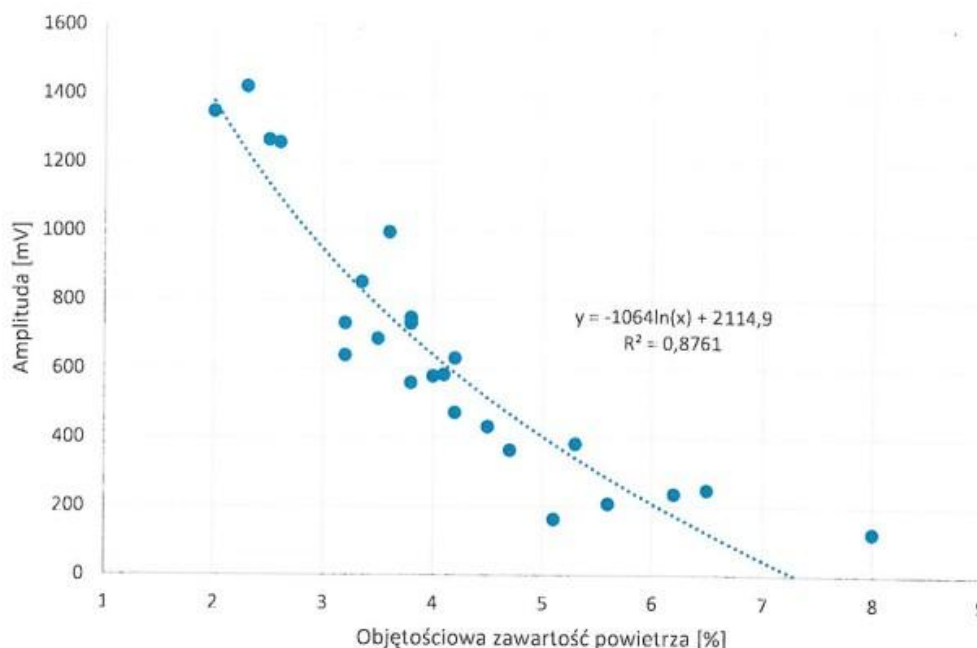
Na rys. 4.1 przedstawiono budowę jednej z pierwszej wersji nadajnika wibroakustycznego.



Rys. 4.1 Schemat budowy nadajnika wibroakustycznego – jedna z pierwszych wersji.

Nadajnik składa się z: sztywnej membrany, elastycznego uszczelnienia pomiędzy membraną, a obudową, cewki oraz magnesów stałych. Odbiornik składa się z cienkiej sprężystej stali oraz czujnika piezoelektrycznego. Z powodzeniem wykonano badania amplitudy oraz przesunięcia fali.

Na rys. 4.2 przedstawiono wyniki badań objętościowej zawartości powietrza oraz amplitudy drgań propagowanych przez mieszankę betonową. Badania przeprowadzono dla częstotliwości 400 Hz. Amplitudę drgań przedstawiono w formie napięcia występującego na wyjściu odbiornika.



Rys. 4.2 Zależność pomiędzy objętościową zawartością powietrza, a amplitudą drgań propagowanych przez mieszankę betonową.

Wystąpiła silna zależność pomiędzy amplitudą drgań, a objętościową zawartością powietrza. Wraz z rosnącą objętościową zawartością powietrza maleje amplituda drgań propagowanych przez mieszankę. Fale akustyczne są najsilniej wytłumiane podczas przejścia pomiędzy fazami. Płynna mieszanka betonowa składa się z trzech faz: gazowa (powietrze), ciekła (umownie: zaczyn cementowy), stała (umownie: piaski i kruszywa). Wraz ze wzrostem objętościowej zawartości powietrza wzrasta ilość pęcherzyków powietrza, a co za tym idzie wzrasta szansa na wytłumienie fali akustycznej.

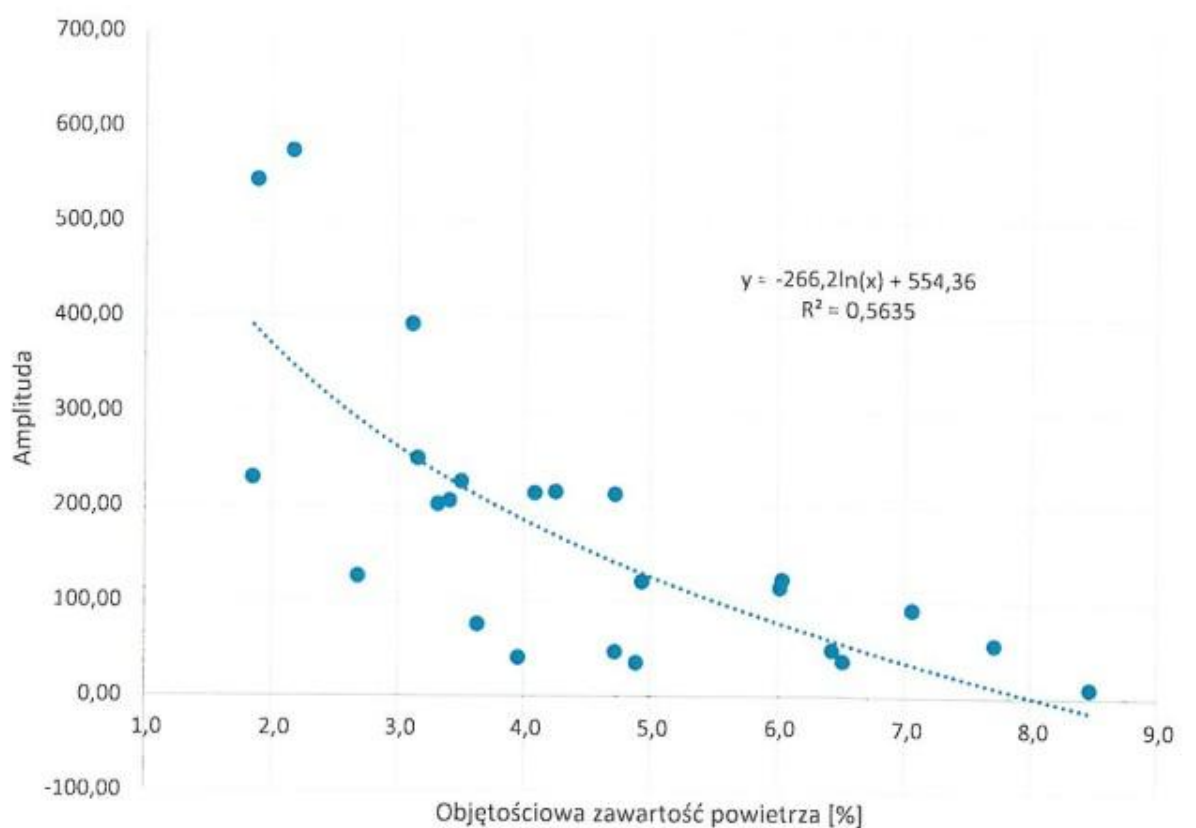
Urządzenie laboratoryjne posiadało wiele cech, które uniemożliwiały jego zastosowanie w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Odbiornik sensora laboratoryjnego był zbyt delikatny do użytku w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, ponieważ jego konstrukcja była zaprojektowana, w taki sposób, aby był on możliwie maksymalnie wrażliwy na odbiór fal dźwiękowych w warunkach laboratoryjnych, których dynamika jest statyczna.

W rezultacie przeprowadzanych prac badawczych otrzymano charakterystykę spełniającą oczekiwania. Na tej podstawie zaprojektowano i wykonano kolejną wersję sensora umożliwiającą dokonanie badań w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

4.4 Badanie objętościowej zawartości powietrza w mieszance betonowej za pomocą pomiaru tłumienia propagowanych fal dźwiękowych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych

Celem przeprowadzania badań objętościowej zawartości powietrza w warunkach zbliżonych do rzeczywistych było wykonanie wielu ulepszeń czujnika laboratoryjnego. W początkowym etapie dokonano ulepszeń odbiornika. Zaprojektowano odbiornik, którego budowa była analogiczna do nadajnika z badań laboratoryjnych z tą różnicą, że był on wyposażony w przyspieszeniomierz dokonujący pomiaru drgań w trzech

osiach. Na rys. 4.3 przedstawiono wyniki badań uzyskanych za pomocą wyżej wymienionego sensora. Amplitudę drgań przedstawiono w napięciu na wyjściu czujnika wyrażoną w [mV].



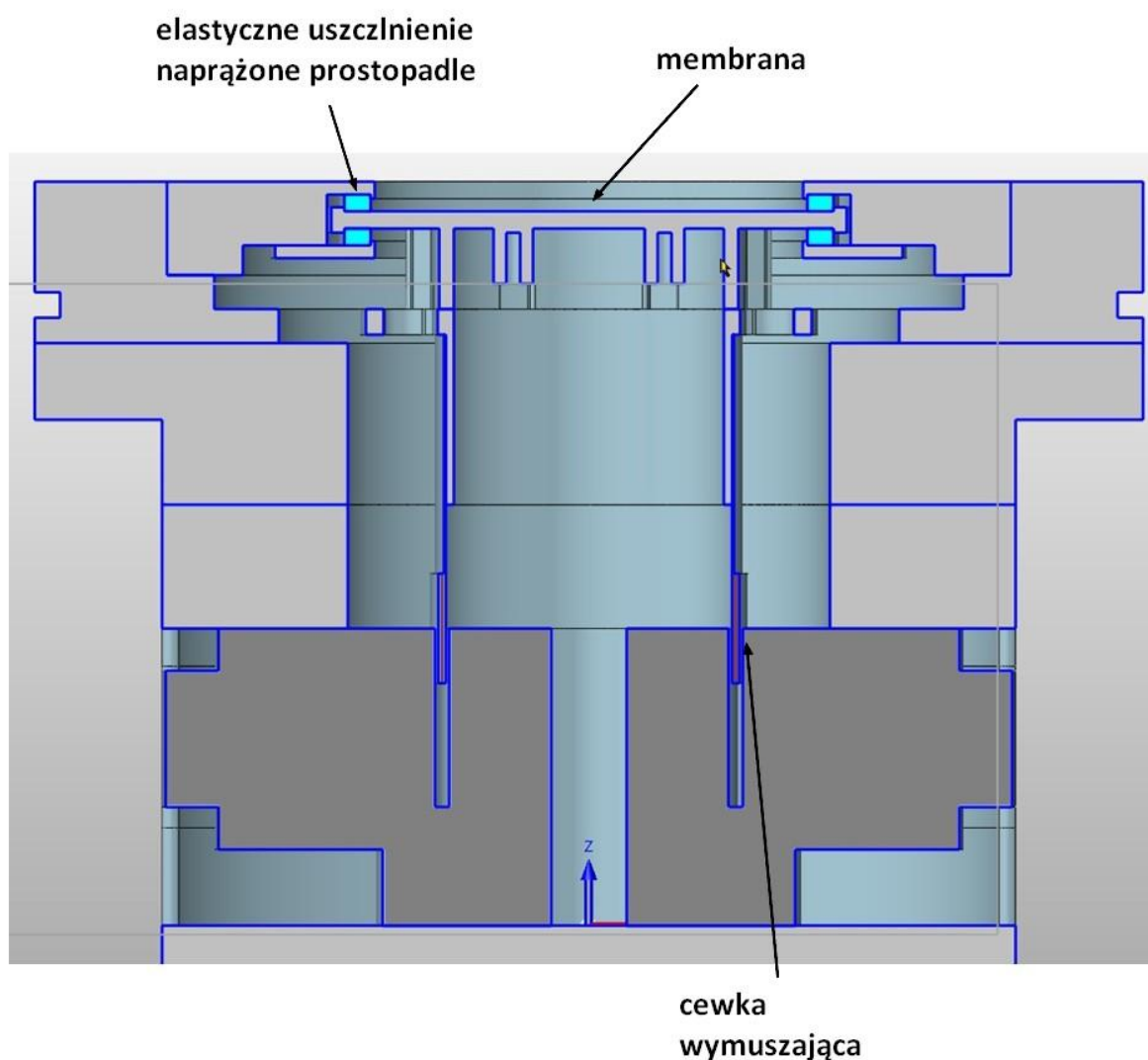
Rys 4.3 Zależność pomiędzy objęściową zawartością powietrza, a amplitudą drgań w warunkach zbliżonych do rzeczywistych z sensorem wyposażonym w nadajnik z równolegle naprężonym uszczelnieniem oraz analogicznie zbudowanym odbiornikiem wyposażonym w przyspieszeniomierz.

Charakterystyka objęściowej zawartości powietrza, a amplitudą drgań wyznaczona za pomocą ww. sensorem uzyskała współczynnik determinacji na poziomie 0,56 co jest wartością niską.

Ww. sensor posiadał wiele cech, które powodowały nieprawidłową dynamikę jego pracy. Konstrukcja ww. nadajnika nie nadawała się do użytku w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Elastyczne uszczelnienie sensora laboratoryjnego było wstępnie naprężone prostopadle do powierzchni membrany. Zarówno powierzchnia elastycznego uszczelnienia oraz membrany były równoległe z powierzchnią ścian betonowozu, co w trakcie ruchu bębna betonowozu powodowało dodatkowe drgania wywołane mieszanką betonową. Dodatkowo równoległe naprężenie uszczelnienie charakteryzowało się niską jakością dynamiki pracy co, zaś powodowało zwiększone obciążenie cewki. W takim układzie cewka wymuszająca jest zbyt obciążona co powodowało jej uszkodzenia i w efekcie wymagało stałej kontroli jej temperatury, celem uniknięcia jej uszkodzenia. Nie zmienia to faktu, że za pomocą odpowiednich

procedur badawczych zastosowanych w laboratorium możliwe było przeprowadzanie badań, ale wymagało to ulepszeń.

Kolejno celem poprawy konstrukcji nadajnika zastosowano dodatkowe uszczelnienie przed uszczelnieniem elastycznym, ale takie rozwiązanie wprowadzało opory tarcia podczas drgań membrany, co w rezultacie powodowało znaczne zwiększenie obciążenia elektrycznego cewki wymuszającej i w praktyce uniemożliwiło wygenerowanie fali akustycznej o wymaganej charakterystyce. Kolejne ulepszenie nadajnika polegało na zmianie kierunku wstępnego naprężenia uszczelnienia z równoległego do prostopadłego do płaszczyzny membrany. Na rys 4.4 przedstawiono przekrój jednej z wersji sensora, który charakteryzował się dobrą dynamiką pracy w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.



Rys. 4.4 Przekrój sensora wibroakustycznego z prostopadle naprężonym uszczelnieniem.

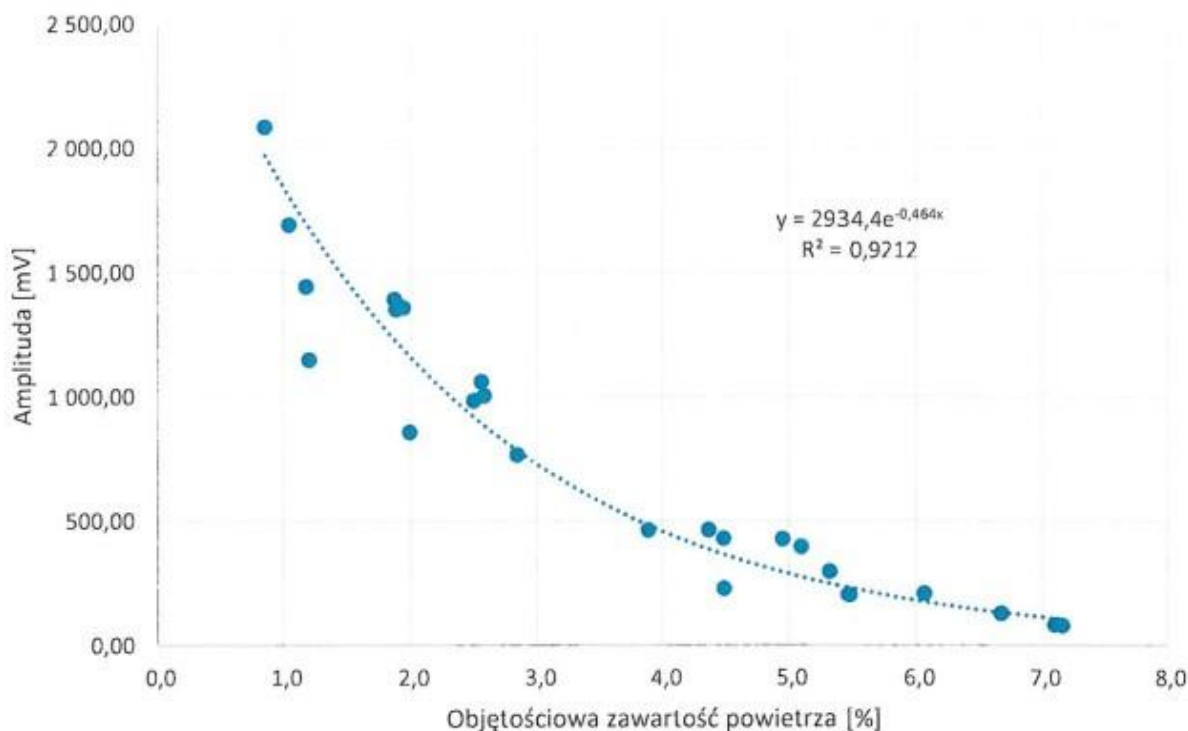
Na Fot. 4.2 Przedstawiono zewnętrzny widok na membranę sensora wibroakustycznego.



Fot. 4.2 Widok sensora wibroakustycznego: na środku okrągły element to membrana wymuszająca drgania; niebieskie otoczenie membrany – elastyczne uszczelnienie naprężone prostopadle.

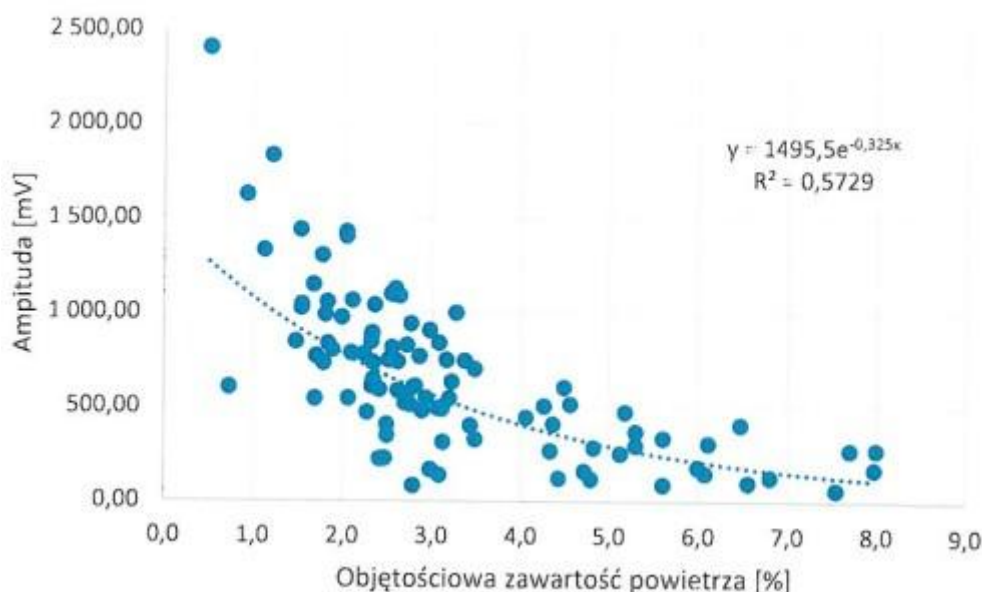
Wstępne naprężenie prostopadle pozwoliło na zachowanie szczelności sensora oraz znacznie usprawniło dynamikę pracy nadajnika. Kolokwialnie mówiąc wstępnie „ściśnięte” uszczelnienia pozwala na zmagazynowanie energii, zaś pod wpływem wymuszenia z jednej strony następuje jego jeszcze większe ściśnięcie, które powoduje zmagazynowanie jeszcze większej ilości energii. Po zmianie kierunku ruchu energia ta jest uwalniana, co poprawia lepszą dynamikę ruchu oraz energooszczędność względem wersji poprzednich. Sensor ten jest zasilany akumulatorowo, więc zwiększenie energooszczędności jest cechą pożądaną. W takiej konfiguracji nadajnik generował fale akustyczne o znacznie czystszy przebiegu niż w urządzeniu laboratoryjnym przy jednoczesnym zmniejszeniu obciążenia cewki wymuszającej. Zmniejszone obciążenie cewki pozwala na zwiększenie jej żywotności oraz większą ilość badań w danej jednostce czasu. Kolejnym etapem było ulepszenie odbiornika. W ramach kolejnych badań wykonano wiele wersji sensora między innymi: sensor z przyspieszeniomierzem dokonującym pomiaru drgań umieszczony na nadajniku; niezależny odbiornik wyposażony w Hallotronowy czujnik przemieszczenia. W

warunkach zbliżonych do rzeczywistych oraz w warunkach rzeczywistych najlepsze rezultaty osiągnięto dla sensora wyposażonego w czujnik Hallotronowy przemieszczenia, gdzie ruch membrany był możliwy jedynie w kierunku osi drań wymuszenia. Na rys. 4.5 przedstawiono wyniki badań wykonanych w warunkach rzeczywistych w zakresie krótkoterminowym wykonanych ww. sensorem.



Rys. 4.5 Zależność pomiędzy objętościową zawartością powietrza, a amplitudą drgań w warunkach rzeczywistych w zakresie krótkoterminowym wykonanych ulepszoną wersją sensora wibroakustycznego.

W zakresie krótkoterminowym współczynnik determinacji zależności pomiędzy objętościową zawartością powietrza, a amplitudą propagowanych drgań wyniósł około 0,92. Wraz z rosnącą ilością prób oraz poziomem eksploatacji współczynnik determinacji pomiarów zmniejszał się. Między innymi zabrudzenia spowodowane przez mieszankę betonową pogarszały jakość pomiaru. Zmieniono konstrukcję sensora w taki sposób, aby zarówno odbiornik i nadajnik był wyposażony w cewkę wymuszającą, która poprzez wibracje dokonywała oczyszczania sensora z mieszanki betonowej. Powierzchnię membran od strony zewnętrznej wykonano z trudnościeralnego tworzywa sztucznego oraz od strony wewnętrznej z sztywnego aluminium. Kompozytowa konstrukcja membrany pozwoliła zachować sztywność za pomocą aluminium, zaś powierzchnię o niższym stopniu przylegania zabrudzeń uzyskano za pomocą tworzywa sztucznego. Mimo wszystkich zastosowanych działań naprawczych nie uzyskano wymaganego współczynnika determinacji dla badań długoterminowych. Na rys 4.6 przedstawiono wyniki badań wykonanych w warunkach rzeczywistych w zakresie długoterminowym.



Rys. 4.6. Zależność pomiędzy objętościową zawartością powietrza, a amplitudą drgań w warunkach rzeczywistych w zakresie długoterminowym.

W zakresie badań długoterminowych w warunkach rzeczywistych wraz z upływem czasu wzrastają zabrudzenia sensora oraz dochodzi do nadmiernego zużycia uszczelnienia elastycznego co powoduje, że współczynnik determinacji maleje do wartości poniżej 0,6. Uniemożliwia to dokonywanie na tyle dokładnych pomiarów objętościowej zawartości powietrza, aby użytkownik mógł zaufać systemowi oraz możliwe było dozowanie odpowiednich plastyfikatorów.

Poniżej przedstawiono najważniejsze wnioski pomiaru objętościowej zawartości powietrza mieszanki betonowej:

- A. Fale ultradźwiękowe są nie propagowane przez płynną mieszankę betonową lub ich propagacja jest na tyle mało intensywna, że nie uzyskano pomiaru ich propagacji.
- B. Fale dźwiękowe w zakresie od 50 Hz do 6500 Hz są wyraźnie propagowane przez mieszankę betonową, a maksimum amplitudy propagowania fal następuje przy częstotliwości około 400-500 Hz.
- C. Występuje silna zależność pomiędzy tłumieniem fal dźwiękowych w wymienionym zakresie częstotliwości, a objętościową zawartością powietrza. Wraz ze wzrostem objętościowej zawartości powietrza maleje propagacja fal dźwiękowych, tj. maleje ich amplituda.
- D. Elementy elastyczne sensora akustycznego są jedną z przyczyn dla których wraz z upływem czasu malej współczynnik determinacji pomiarów wykonanych sensorem, ale na ich obniżenie mają również powstające zanieczyszczania oraz ścieranie się sensora.

5. Podsumowanie

Płynna mieszanka betonowa jest złożoną zawiesiną, która tworzy niekorzystne środowisko pracy dla sensorów w szczególności tych z elementami elastycznymi. W warunkach zbliżonych do rzeczywistych sensor służący do pomiaru konsystencji, który bazuje na pomiarze kąta wychylenia mieszanki betonowej w trakcie jednostajnego ruchu obrotowego bębna betonowozu osiągnął najwyższy współczynnik determinacji.

W zasadzie tego typu pomiar bazuje na pomiarze oporów ruchu mieszanki betonowej. Wraz ze wzrostem oporów ruchu mieszanki betonowej kąt wychylenia zwiększa się.

Wraz ze wzrostem objętościowej zawartości powietrza opory ruchu w mieszance betonowej maleją, a co za tym idzie maleje kąt wychylenia mieszanki betonowej. Na pomiar konsystencji mieszanki betonowej mierzonej opadem stożka w znacznym stopniu wpływa objętościowa zawartość powietrza. Wartość opadu stożka, nie jest proporcjonalny do oporów ruchu w mieszance betonowej. Zakładając stały opad stożka mieszanka betonowa o wysokiej objętościowej zawartości powietrza charakteryzuje się niższymi oporami ruchu niż mieszanka betonowa o niższej objętościowej zawartości powietrza. Z tego powodu w celu wyznaczenia konsystencji mieszanki betonowej jako ekwiwalentu opadu stożka za pomocą metody użytej w sensorze wymagane jest określenie z dość dużą dokładnością objętościowej zawartości powietrza w mieszance betonowej.

Elastyczne elementy okazały się słabą stroną sensora, które w znacznym stopniu obniżają jakość pomiarów zarówno konsystencji jak i objętościowej zawartości powietrza mieszanki betonowej. Początkowo sensor do pomiaru konsystencji mieszanki betonowej posiadał elastyczne elementy, ale w trakcie realizacji prac badawczo rozwojowych opracowano konstrukcję sensora do pomiaru konsystencji mieszanki betonowej pozbawionej elastycznych elementów.

Ze względu iż najlepsze wyniki pomiaru objętościowej zawartości powietrza w mieszance betonowej osiągnięto za pomocą sensora wibroakustycznego pracującego w częstotliwościach od 50 Hz do 6500 Hz to do jego prawidłowej pracy wymagane jest użycie elastycznych elementów. Mimo wielu udoskonaleń jego konstrukcji nie osiągnięto wymaganego rezultatu pomiaru objętościowej zawartości powietrza w warunkach rzeczywistych. Celem zdobycia zaufania użytkownika do pomiarów sensora to sensor musi dawać stale dobre wyniki pomiarów w rozsądnym czasie jego eksploatacji.

Celem projektu było automatyczne utrzymywanie parametrów mieszanki betonowej za pomocą ich automatycznego pomiaru. Okazało się, że w warunkach rzeczywistych niemożliwym jest dokonywanie pomiarów parametrów mieszanki betonowej, a co a tym idzie niemożliwe jest ich automatyczne kontrolowanie.

6. Literatura

- [1] Hossein Sallehi „Characterization of Cement Paste in Fresh State Using Electrical Resistivity Technique”, 2015
- [2] K. Obla, R. Hong, and S. Sherman D.P. Bentz and S.Z. Jones „Relating the Electrical Resistance of Fresh Concrete to Mixture Proportions”, 2018
- [3] Yoronobu Murata, Hiroki Toda and Kenta Sumikawa and Kengo Futagami „Basic Study on Estimation for Water-Cement Ratio of Fresh Concrete Using Ultrasonic Wave”, 2004

inż. Kamil Fiks, ATLAS Sp. z o.o., Pion Domieszek do Betonu,
mgr inż. Patryk Kucharski, ATLAS Sp. z o.o., Pion Domieszek do Betonu,
mgr inż. Arkadiusz Ignierowicz, ATLAS Sp. z o.o., Pion Domieszek do Betonu,
mgr inż. Michał Oleksik, ATLAS Sp. z o.o., Pion Domieszek do Betonu,

Zastosowanie cementów niskoemisyjnych w projektowaniu mieszanek betonowych w warunkach zimowych

The use of low-emission cements in the design of concrete mixtures in winter conditions

Streszczenie

Weryfikacja deklarowanych właściwości betonu następuje z reguły po 28 dniach jego dojrzewania lub po zastosowaniu czasu równoważnego zgodnie z uzupełnieniem krajowym normy PN-EN 206+A2:2021-08. Z uwagi na konieczność zachowania ciągłości robót oraz brak planowanych przerw roboczych, oczekiwania wobec betonu na placu budowy są zdecydowanie szybsze. Kontynuacja prac budowlanych w wielu przypadkach odbywa się po czasie od kilkunastu do kilkudziesięciu godzin od momentu ułożenia mieszanki betonowej. O ile w warunkach letnich spełnienie tych wymagań nie jest zbyt wymagające, o tyle w warunkach zimowych osiągnięcie odpowiedniego pułapu wytrzymałościowego we wczesnych etapach dojrzewania betonu jest trudne do uzyskania.

W referacie na przykładzie mieszanki o klasie wytrzymałości C20/25 przeznaczonej do stosowania w tzw. okresie letnim, pokazano wpływ obniżenia temperatury otoczenia dojrzewania betonu na rozwój wytrzymałości. Następnie poprzez liczne warianty modyfikacji składu mieszanki dokonano poprawy wytrzymałości wczesnych betonu.

Celem tej pracy jest zwrócenie uwagi na odpowiednie podejście do projektowania mieszanek betonowych uwzględniające zmienność warunków atmosferycznych wraz ze zmieniającymi się porami roku. Rozwiązania całoroczne mogą funkcjonować jedynie przy zachowaniu stałych parametrów otoczenia mieszanki tj. wilgotność, temperatura, nie pomijając oczywiście obowiązku pielęgnacji. Odstępstwa od tej zasady powinny być każdorazowo uwzględnione przez technologa w czasie procesu ustalania składu mieszanki.

Abstract

Verification of declared concrete properties typically occurs after 28 days of curing, or after an equivalent period in accordance with the national supplement to the PN-EN 206+A2:2021-08 standard. Due to the need to maintain work continuity and the lack of planned work breaks, expectations for concrete on site are significantly shorter. In many cases, construction work resumes several to several dozen hours after the concrete mix is poured. While meeting these requirements is not overly demanding in summer conditions, achieving the appropriate strength level in the early stages of concrete curing is difficult in winter conditions.

In this paper, using a C20/25 strength class mix intended for use in the summer, the effect of lowering the ambient temperature during concrete curing on strength

development was demonstrated. Subsequently, numerous modifications to the mix composition were used to improve the early strength of concrete.

The aim of this paper is to highlight the appropriate approach to designing concrete mixes, taking into account the variability of atmospheric conditions and the changing seasons. Year-round solutions can only function when maintaining constant ambient parameters, such as humidity and temperature, while also taking into account the maintenance requirements. Deviations from this rule should be considered by the technologist during the mix composition process.

1. Założenia projektowe – opis badań

Celem podjętych badań była ocena wpływu modyfikacji składów mieszanek na wytrzymałość na ściskanie stwardniałego betonu.

W badaniach wykorzystano następujące surowce:

- Piasek 0/2,
- Grys wapienny 2/8,
- Grys wapienny 8/16,
- CEM II/B-M(S-V) 42,5N,
- CEM II/A-LL 42,5R,
- Popiół lotny,
- Woda wodociągowa,
- ATLAS Primo LM-710,
- ATLAS Duruflo PE-821,
- ATLAS Ligocel AW-540,

Składy receptur zostały wybrane tak, aby opad stożka wynosił 130-150 mm (górna granica konsystencji S3, najczęściej spotykana na placu budowy) przy jednoczesnym zachowaniu warunku odpowiedniej urabialności, bez oznak segregacji oraz bleedingu mieszanki betonowej.

Próbki od razu po zaformowaniu trafiły do komory klimatycznej, której parametry robocze ustawiono na:

- Temperatura – 5°C,
- Wilgotność – 35%,

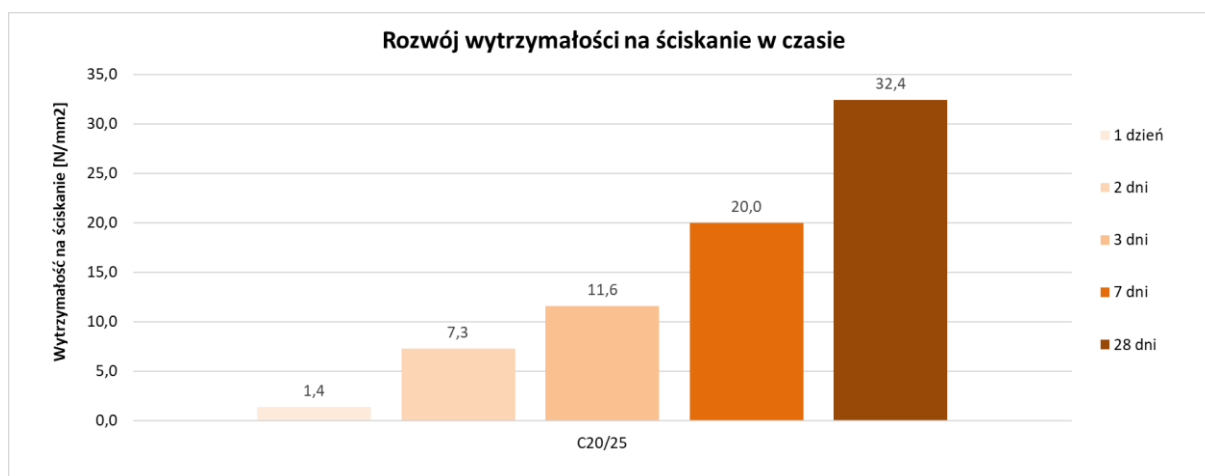
Część próbek opisanych w punkcie „2.6 Pielęgnacja”: była pielęgnowana poprzez obłożenie izolacją termiczną w postaci styropianu, oraz folią.

Punktem odniesienia była mieszanka C20/25 z przeznaczeniem do stosowania w okresie letnim [Tabela 1][Rys. 1]. Jedna jej wersja była pielęgnowana zgodnie z PN-EN 12390-2:2019-7, natomiast druga celem odwzorowania błędnego postępowania wielu producentów betonu, którzy nie dostosowują się do zmiennego klimatu i traktują swoje rozwiązania uniwersalnie korzystając z nich w ciągu całego roku, trafiła do komory klimatycznej (warunki opisane wyżej), gdzie została przykryta folią [Rys. 2]. Analizę wyników wytrzymałościowych ograniczono do pierwszych trzech dni dojrzewania betonu. Sugerowano się przy tym standardowymi wymaganiami budów co do konieczności zachowania ciągłości robót oraz kontynuacji prowadzenia prac budowlanych. Był to również wystarczający czas do uzyskania przez beton wzorcowy wytrzymałości krytycznej po której uzyskaniu beton osiąga pełną odporność na zamrożenie(dla CEM I wynosi 5MPa, dla CEM II – 8MPa, dla CEM III – 10MPa). Beton

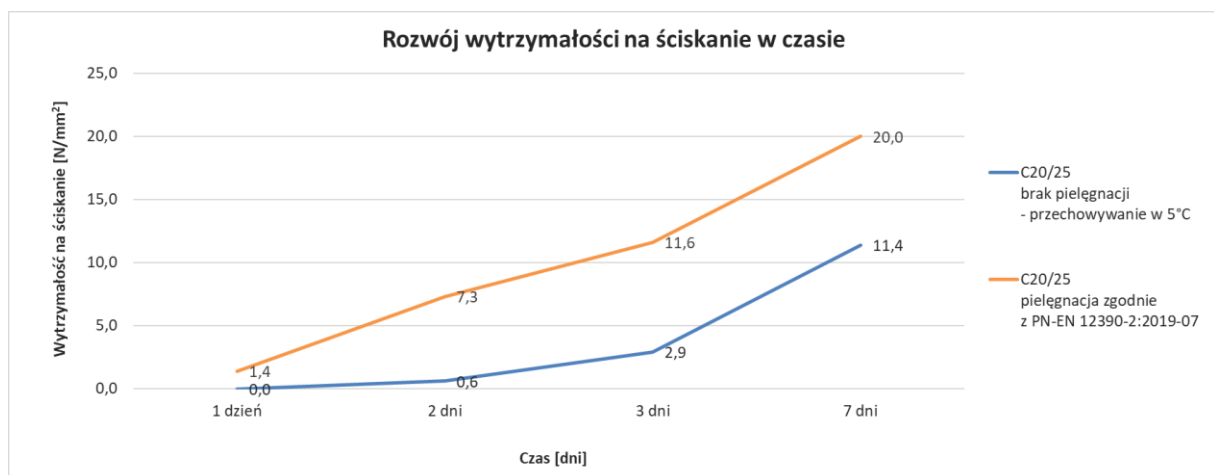
wzorcowy pielęgnowany zgodnie z normą uzyskał bezpieczną wartość pomiędzy 2, a 3 dniem dojrzewania, podczas gdy ten sam beton przechowywany w 5°C bez pielęgnacji granicę 8MPa osiągnął 4 dni później[Rys. 2]. W punkcie „2. Modyfikacje mieszanki – badania i dyskusja wyników” poprzez liczne zmiany w składzie mieszanek dokonano próby poprawy właściwości wytrzymałościowych betonów dojrzewających w komorze klimatycznej

Tabela 1. Składy mieszanki betonowej C20/25

Składniki	Ilość [kg/m ³]	
Piasek 0/2	750	
Grys wapienny 2/8	485	
Grys wapienny 8/16	520	
CEM II/B-M(S-V) 42,5N	250	
Popiół lotny	80	
Woda całkowita	181	
ATLAS Primo LM-710	0,60%	1,98
ATLAS Duruflow PE-821	0,30%	0,99



Rys. 1. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie



Rys. 2. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od rodzaju przechowywania próbek

Skutki zamrożenia świeżego betonu zależą od okresu, w którym beton ulegnie zamrożeniu. Wydziela się cztery okresy dojrzewania betonu:

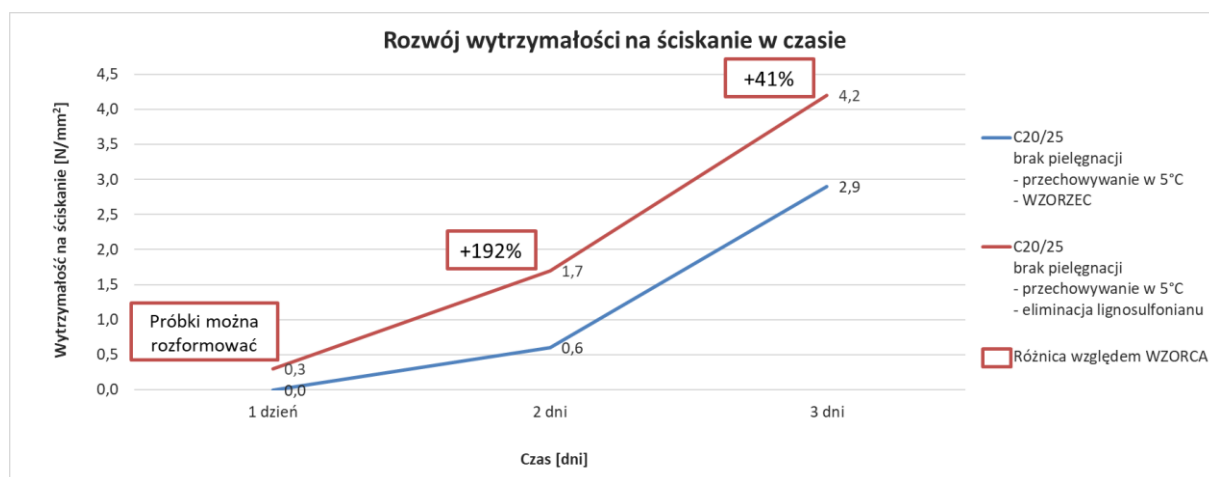
- okres I – przed początkiem wiązania zamrożenie jest stosunkowo mało szkodliwe, chociaż nie pozostaje bez wpływu na wytrzymałość końcową betonu. Następuje zahamowanie wiązania, ale po rozmrożeniu procesy wiązania i twardnienia rozpoczynają się na nowo.
- okres II – po rozpoczęciu wiązania zamrożenie betonu w tym okresie może całkowicie zniszczyć jego strukturę. Największe szkody wskutek zamrożenia występują przed zakończeniem procesu wiązania.
- okres III – po zakończeniu wiązania zamrożenie betonu w tym okresie może całkowicie zniszczyć jego strukturę.
- okres IV – po osiągnięciu tzw. wytrzymałości krytycznej zamrożenie po osiągnięciu wytrzymałości krytycznej nie powinno skutkować zniszczeniem betonu. Beton chroniony do uzyskania wytrzymałości krytycznej jest w stanie osiągnąć założoną wytrzymałość.

2. Modyfikacje mieszanki – badania i dyskusja wyników

2.1. Eliminacja lignosulfonianu

Tabela 2. Składy mieszanek betonowych (modyfikacja mieszanki-eliminacja lignosulfonianu)

Składniki	Oznaczenie zarobu			
	C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - WZORZEC		C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - eliminacja lignosulfonianu	
	Ilość [kg/m³]			
Piasek 0/2	750		751	
Grys wapienny 2/8	485		485	
Grys wapienny 8/16	520		520	
CEM II/B-M(S-V) 42,5N	250		250	
Popiół lotny	80		80	
Woda całkowita	181		181	
ATLAS Primo LM-710	0,60%	1,98	-	-
ATLAS Duruflo PE-821	0,30%	0,99	0,60%	1,98



Rys. 3. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od przyjętej modyfikacji mieszanki (eliminacja lignosulfonianu)

Jednym z najprostszych zabiegów poprawy wytrzymałości wczesnych jest eliminacja domieszki uplastyczniającej na bazie lignosulfonianu. Produkt który z jednej strony odpowiedzialny jest za poprawę urabialności mieszanki betonowej, ułatwia jej wbudowanie, rozprowadzenie i zagęszczenie, z drugiej natomiast jest nośnikiem naturalnie występującego w nim cukru, mającego działanie opóźniające proces hydratacji. Po usunięciu wspomnianej domieszki ze składu mieszanki zdecydowaną różnicę widać już po pierwszym dniu, kiedy to próbki mogły zostać rozformowane w przeciwieństwie do tych zamierzających lignosulfonian [Rys. 3]. Błędem będzie jednak pojmowanie domieszek uplastyczniających jako tych opóźniających wiązanie. Zgodnie

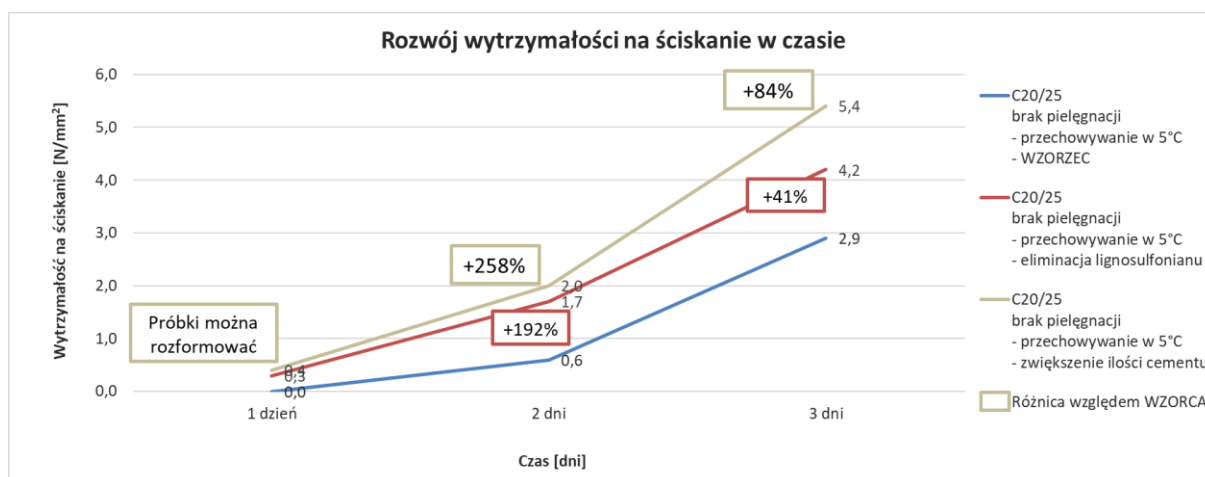
z PN-EN 934-2:2009+A1:2012 muszą one redukować wodę o co najmniej 5%, przy jednoczesnej poprawie wytrzymałości o nie mniej niż 110% względem mieszanki kontrolnej nie zawierającej domieszki [1].

Należy zatem pamiętać że dla zachowania odpowiednich właściwości reologicznych mieszanki betonowej po wyeliminowaniu plastyfikatora należy dokonać odpowiedniej korekty dozowania domieszki upłynniającej. Przy zaniechaniu tego zabiegu, brak konsystencji zapewne zostanie powiązany z koniecznością użycia większej ilości wody co z kolei doprowadzi do sytuacji odwrotnej od zamierzonej – uzyskany zostanie niższy wynik wytrzymałości na ściskanie zarówno wczesnej jak i końcowej.

2.2. Zwiększenie ilości cementu

Tabela 3. Składy mieszanek betonowych (modyfikacja mieszanki-zwiększenie ilości cementu)

Składniki	Oznaczenie zarobu					
	C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - WZORZEC		C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - eliminacja lignosulfonianu		C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - zwiększenie ilości cementu	
	Ilość [kg/m³]					
Piasek 0/2	750		751		755	
Grys wapienny 2/8	485		485		488	
Grys wapienny 8/16	520		520		523	
CEM II/B-M(S-V) 42,5N	250		250		280	
Popiół lotny	80		80		50	
Woda całkowita	181		181		181	
ATLAS Primo LM-710	0,60%	1,98	-	-	-	-
ATLAS Duruflow PE-821	0,30%	0,99	0,60%	1,98	0,65%	2,15



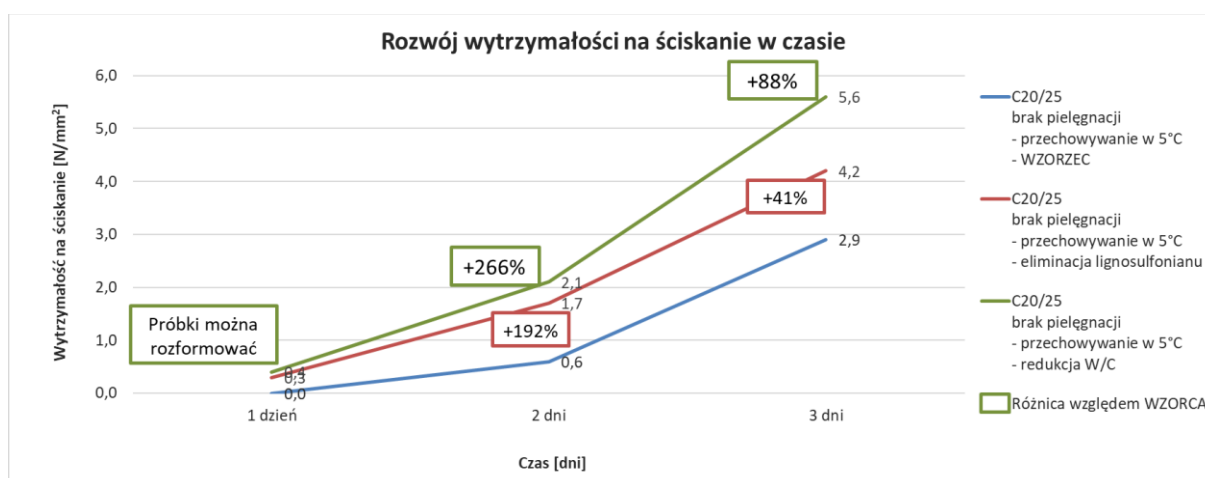
Rys. 4. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od przyjętej modyfikacji mieszanki (zwiększenie ilości cementu)

Kolejnym często spotykanym sposobem na przeprojektowanie mieszanki stosowanej w „okresie letnim” na tę wykorzystywaną w warunkach zimowych jest zwiększenie ilości cementu. Zazwyczaj różnica wynosi ok 20-30kg/m³. W przeprowadzonym projekcie dla zachowania tego samego współczynnika w/s, po zwiększeniu zawartości cementu, zmniejszono zawartość popiołu. Pomimo uzyskania tej samej ilości spoiwa, wprowadzone zmiany proporcji pomiędzy poszczególnymi składnikami mieszanki betonowej wpłynęły na konieczność zmiany dozowania domieszki upłynniającej. Przyjęta modyfikacja pozwoliła na poprawę właściwości trwałościowych nie tylko względem mieszanki wzorcowej (po 2 dniach wynik lepszy o 258%, po 3 dniach o 84%), ale także tej z której wyeliminowano lignosulfonian [Rys. 4]

2.3.Redukcja wskaźnika wodno-cementowego

Tabela 4. Składy mieszanek betonowych (modyfikacja mieszanki-redukcja W/C)

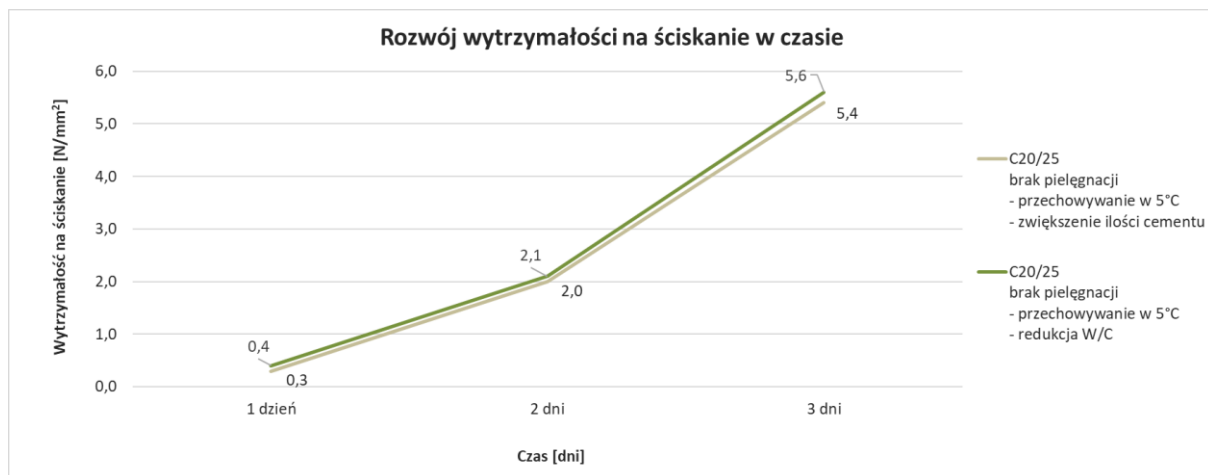
Tabela 4. Składy mieszanek betonowych (modyfikacja mieszanek redukcja W/C)						
Składniki	Oznaczenie zarobu					
	C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - WZORZEC		C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - eliminacja lignosulfonianu		C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - redukcja W/C	
	Ilość [kg/m ³]					
Piasek 0/2	750		751		763	
Grys wapienny 2/8	485		485		493	
Grys wapienny 8/16	520		520		529	
CEM II/B-M(S-V) 42,5N	250		250		250	
Popiół lotny	80		80		80	
Woda całkowita	181		181		169	
ATLAS Primo LM-710	0,60%	1,98	-	-	-	-
ATLAS DurufLOW PE-821	0,30%	0,99	0,60%	1,98	0,80%	2,64



Rys. 5. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od przyjętej modyfikacji mieszanki (redukcja W/C)

Kolejna modyfikacja polegała na zmniejszeniu udziału ilościowego jednego ze składników. Tym razem przy stałej ilości cementu i popiołu korekcie uległo zużycie wody. Redukcja wskaźnika wodno-cementowego z 0,72 do 0,68 była możliwa poprzez zwiększenie dozowania domieszki do 0,80% m.s. przy jednoczesnym zachowaniu właściwości reologicznych.

2.3.1. Porównanie jakościowo-ekonomiczne modyfikacji zwiększającej ilość cementu z modyfikacją redukującą W/C



Rys. 6. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od przyjętej modyfikacji mieszanki (zwiększenie ilości cementu vs redukcja W/C)

Wyniki dwóch poprzednich typów modyfikacji są bardzo zbliżone. Nie ma większego sensu wykazywania wyższości jednego rozwiązania nad drugim przy różnicach w wytrzymałościach rzędu 0,1-0,2MPa [Rys. 6]. Warto zatem zastanowić się, czy skoro jakościowo obie modyfikacje są na podobnym poziomie, to czy z kolei pod względem ekonomicznym, który jest równie istotny, zastosowanie którejś z nich nie będzie zasadniejsze? W tabeli numer 5 przedstawiono analizę kosztową omawianych mieszanek. Ceny przyjęte do kalkulacji są przykładowe. Będą one zależne od lokalizacji oraz czasu wykonania. Po przeprowadzeniu licznych symulacji danego przykładu, wynika z nich, że ekonomiczniejszym rozwiązaniem jest modyfikacja polegająca na redukcji wody. Plusem rozwiązania z większą ilością cementu będzie zapewne wyższa wytrzymałość po 28 dniach, jednak dla poprawy wytrzymałości wczesnych wystarczy drobny zabieg, a nie oferowanie wyższej klasy w cenie niższej.

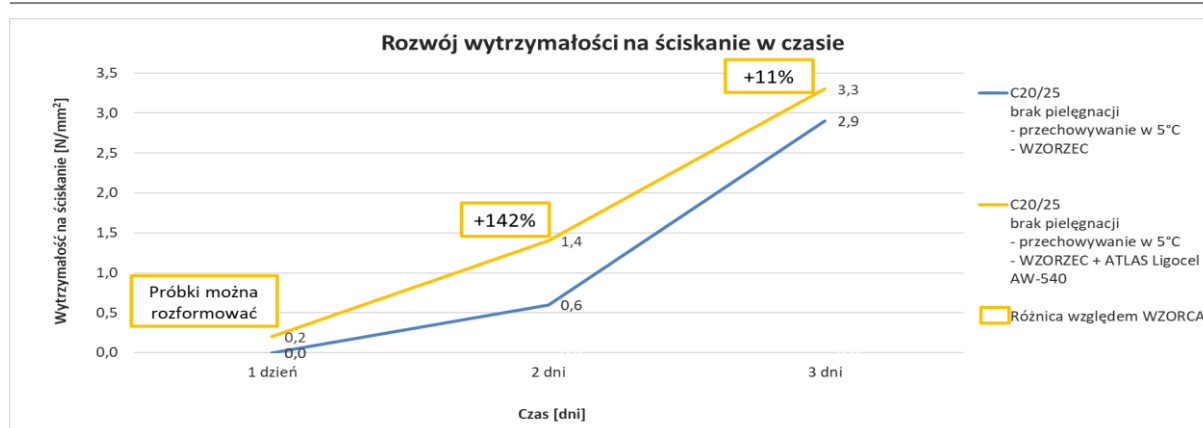
Tabela 5. Analiza kosztowa mieszanek betonowych (zwiększenie ilości cementu vs redukcja W/C)

Składnik	Cena [zł/kg]	Oznaczenie zarobu					
		C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - zwiększenie ilości cementu			C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - redukcja W/C		
		Ilość/Cena [kg]/[zł/m³]					
Piasek 0/2	0,025	755	18,88	763	19,08		
Grys wapienny 2/8	0,090	488	43,92	493	44,37		
Grys wapienny 8/16	0,090	523	47,07	529	47,61		
CEM II/B-M(S-V) 42,5N	0,500	280	140,00	250	125,00		
Popiół lotny	0,150	50	7,50	80	12,00		
Woda całkowita	0,001	181	0,18	169	0,17		
ATLAS Duruflo PE-821	4,00	0,65%	2,15	8,58	0,80%	2,64	10,56
Całkowity koszt [zł/m³]		266,13			258,78		
Różnica względem standardowej produkcji [zł]		x			-7,34		

2.4. Domieszka do betonu przyspieszająca wiązanie cementu

Tabela 6. Składy mieszanek betonowych (domieszka przyspieszająca wiązanie cementu)

Składniki	Oznaczenie zarobu			
	C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - WZORZEC		C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - WZORZEC + ATLAS Ligocel AW-540	
	Ilość [kg/m³]			
Piasek 0/2	750		751	
Grys wapienny 2/8	485		486	
Grys wapienny 8/16	520		521	
CEM II/B-M(S-V) 42,5N	250		250	
Popiół lotny	80		80	
Woda całkowita	181		178	
ATLAS Primo LM-710	0,60%	1,98	0,60%	1,98
ATLAS Duruflo PE-821	0,30%	0,99	0,30%	0,99
ATLAS Ligocel AW-540	0.00%	0.00	1.00%	3.30



Rys. 7. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od przyjętej modyfikacji mieszanki (domieszka przyspieszająca wiązanie cementu)

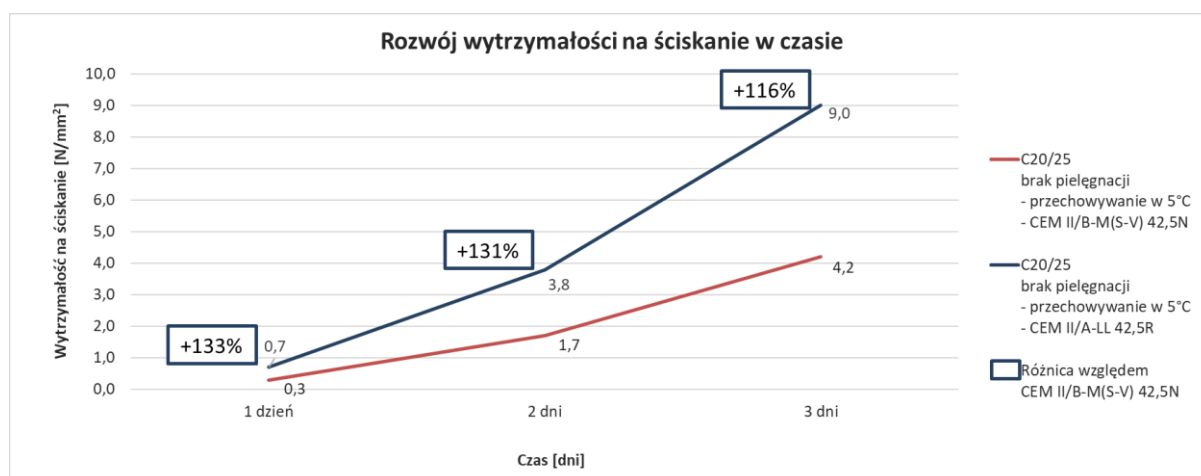
Jeżeli ma się dokonać roszada w zastosowaniu domieszek, to zdecydowanie bardziej popularnym rozwiązaniem od zwiększenia udziału superplastyfikatora prowadzącego do redukcji w/c jest wprowadzenie do składu mieszanki produktów dedykowanych do stosowania w warunkach zimowych. Mowa oczywiście o domieszkach przyspieszających wiązanie i/lub twardnienie cementu. W żargonie budowlanym produkty te nazywane są m.in. jako „mrozówki”, „zimówki” lub „przeciw mrozowe”. Być może to te określenia wraz z brakiem wiedzy oraz świadomości technologicznej doprowadzają do sytuacji, w których wykonawcy robót betoniarskich nie widzą zasadności pielęgnacji mieszanki z uwagi na zamówienie betonu z dodatkiem „zimowym”. Wspomniane domieszki przyspieszają hydratację cementu, pozwalają na uzyskanie wysokich wytrzymałości wczesnych oraz obniżają temperaturę zamarzania zaczynu cementowego, jednak nie zwalniają z obowiązku odpowiedniego opiekowania się mieszanką w początkowych etapach jej dojrzewania.

Efektywne działanie domieszki przyspieszającej wiązanie cementu w projekcie przedstawiono na najbardziej wymagającej próbie z wykorzystaniem plastyfikatora oraz superplastyfikatora. Dzięki zastosowaniu wspomnianego rozwiązania już po pierwszym dniu udało się rozformować próbki, natomiast różnica wytrzymałości pomiędzy porównywanymi betonami po 2 dniach wyniosła 142% [Rys. 7]. Prezentowany wzrost wytrzymałości wczesnych nie ma jednak przełożenia na wyższy wynik po 28 dniach. Poprawnym zabiegiem przy stosowaniu przyspieszacza wiązania cementu jest odjęcie od wody całkowitej w składzie mieszanki, ilości wody wprowadzonej wraz z domieszką.

2.5. Zmiana cementu

Tabela 7. Składy mieszanek betonowych (zmiana cementu)

Składniki	Oznaczenie zarobu			
	C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - CEM II/B-M(S-V) 42,5N		C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - CEM II/A-LL 42,5R	
	Ilość [kg/m³]			
Piasek 0/2	751		750	
Grys wapienny 2/8	485		485	
Grys wapienny 8/16	520		520	
CEM II/B-M(S-V) 42,5N	250		-	
CEM II/A-LL 42,5R	-		250	
Popiół lotny	80		80	
Woda całkowita	181		181	
ATLAS Duruflex PE-821	0,60%	1,98	0,60%	1,98



Rys. 8. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od przyjętej modyfikacji mieszanki (zmiana cementu)

Uniwersalne rozwiązania całoroczne mogą znaleźć zastosowanie jedynie przy zachowaniu stałych parametrów otoczenia mieszanki tj. wilgotność, temperatura. W Polsce przy zmieniającym się sezonowo klimacie jest to niemożliwe. Można próbować poruszać się wokół pewnej grupy surowców sterując ich proporcjami, jednak może okazać się, że kolejne modyfikacje nie dają zamierzonego efektu.

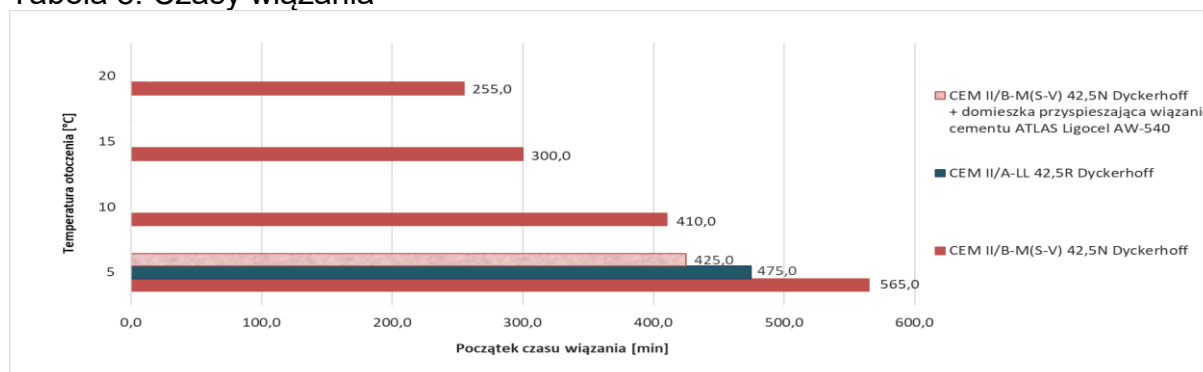
Zgodnie z PN-EN 197-1:2012 [2] - CEM II/B-M(S-V) 42,5N charakteryzuje się normalną wytrzymałością wczesną. Chcąc poprawić ten parametr poprzez zmianę cementu można obrać jedną z dwóch dróg. Pierwszą jest wybór cementu o wyższej klasie wytrzymałości normowej, w tym przypadku klasa 42,5 zostanie zamieniona na 52,5 (zmiana w obrębie tej samej wytrzymałości wczesnej – N). Drugą jest zmiana

cementu na szybszy – czyli z oznaczenia N, należy przejść na R. W wykonanym projekcie zastąpiono cement CEM II/B-M(S-V) 42,5N przez CEM II/A-LL 42,5R. Ruch ten sprawił pozostanie w grupie cementów portlandzkich wieloskładnikowych, których emisyjność CO₂ względem CEM I 42,5R jest na zdecydowanie niższym poziomie. Zamiana wspomnianych cementów pozwoliła na dwukrotne poprawienie wyników w analizowanym przedziale czasowym. Po raz pierwszy osiągnięto wytrzymałość krytyczną w porównywalnym czasie jak próba oznaczona jako „C20/25 – pielęgnacja zgodnie z normą PN-EN 12390-2:2019-7”[Rys. 2].

Przy wyborze cementu warto analizie poddać bardziej szczegółowe dane niż same oznaczenia liczbowo literowe. Różnica pomiędzy klasami wytrzymałości 42,5N, a 42,5R lub 42,5N, a 52,5N może być niewielka, co spowoduje, że oczekiwany efekt będzie daleki od otrzymanego rezultatu.

2.5.1. Czasy wiązania

Tabela 8. Czasy wiązania



By móc ocenić zasadność stosowania danego rodzaju cementu w określonych warunkach wykonano badania czasu wiązania. Z analizy wyników uzyskanych dla CEM II/B-M(S-V) 42,5N wynika, że wraz z obniżeniem temperatury o kolejne 5°C, początek czasu wiązania znacznie się wydłużał. Zamiana CEM II/B-M(S-V) 42,5N na CEM II/A-LL 42,5R pozwoliła przyspieszyć wiązanie w 5°C, o niemalże 100minut. Redukcja o kolejne 50 minut była możliwa dzięki zastosowaniu cementu żużlowo-popiołowego wraz z domieszką przyspieszającą jego wiązanie.

2.6. Pielęgnacja

Proces pielęgnacji dla każdego z technologów jest zwięźceniem prac związanych z zaprojektowaniem i wyprodukowaniem mieszanki betonowej. To od niego w dużej mierze będzie zależeć powodzenie projektu. O ile w warunkach laboratoryjnych nie jest ciężko spełnić wymagania normy PN-EN 12390-2:2019-07 mówiącej o poprawnym wykonaniu i pielęgnacji próbek do badań wytrzymałościowych [3], o tyle na placu budowy bywa różnie. O konieczności pielęgnacji wiedzą wszyscy, ale jeśli do niej dochodzi, to nie zawsze w sposób właściwy. Składa się na to wiele okoliczności. Pierwszą z nich jest to, że proces pielęgnacji przebiega poza głównym frontem betonowania, bez wpływu na postęp robót. Druga okoliczność to częste przekonanie kierownictwa robót do zasadności wykonywania dodatkowych czynności, przy jednoczesnym braku skrajnie szkodliwych warunków otoczenia jak mróz, upał, silny wiatr. Trzecia okoliczność jest konsekwencją dwóch pierwszych – do zajmowania się

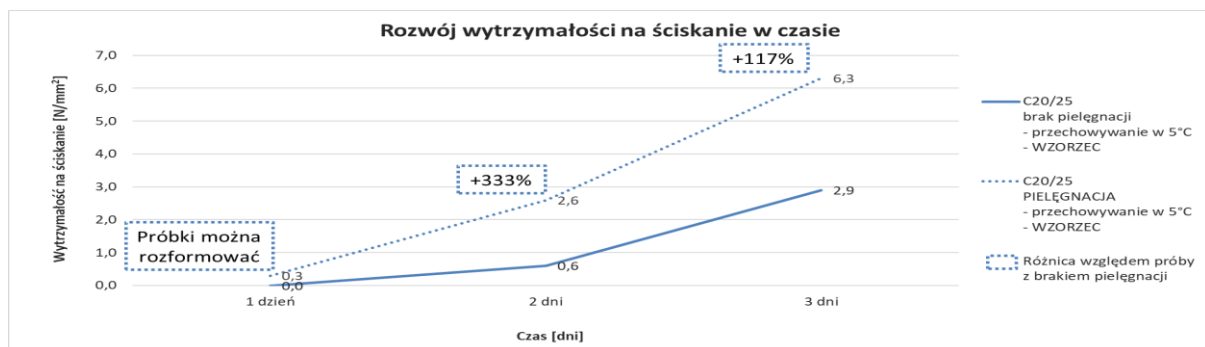
pielęgnacją betonu na budowach kierowani są zwykle przypadkowi robotnicy bez świadomości odpowiedzialności powierzonego im zadania[4].

W finalnym etapie tej pracy przedstawiono na wybranych modyfikacjach wpływ pielęgnacji na rozwój wytrzymałości na ściskanie próbek przechowywanych w komorze klimatycznej w 5°. Pielęgnowane próbki były obłożone izolacją termiczną w postaci styropianu, a następnie obłożone folią.

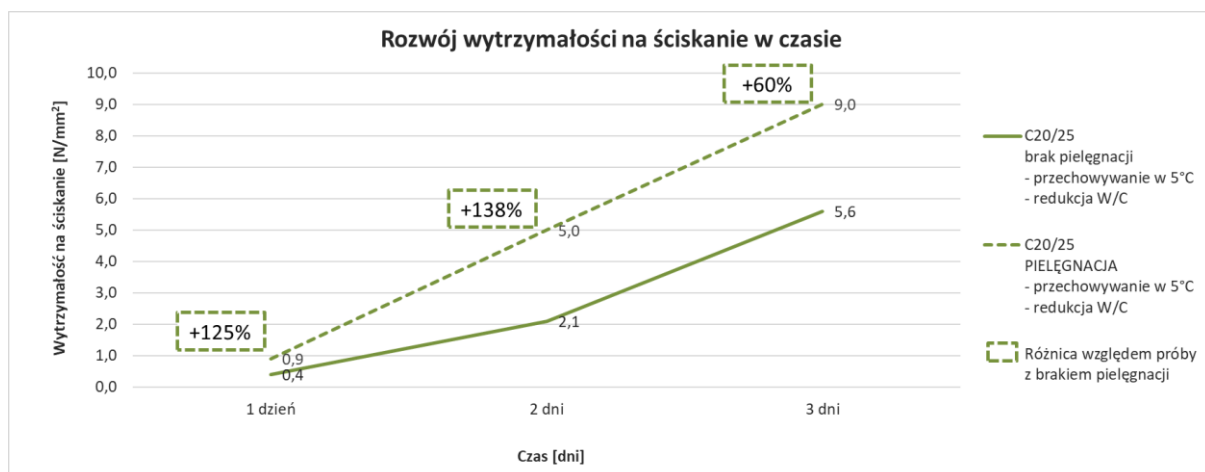
Na przykładzie próbek z mieszanki wzorcowej widać że sama pielęgnacja pozwala na ich rozformowanie pierwszego dnia. Następnie po 2 dniach wynik wytrzymałościowy jest 4-krotnie wyższy niż próbek nie pielęgnowanych (o 333% więcej), natomiast po 3 dniach 2-krotnie wyższy.

Dzięki procesowi pielęgnacji, próbce modyfikacji polegającej na redukcji w/c udało się osiągnąć wytrzymałość krytyczną (dla CEM II wynosi 8MPa) w porównywalnym czasie jak próba oznaczona jako „C20/25 – pielęgnacja zgodnie z normą PN-EN 12390-2:2019-7”[Rys. 2].

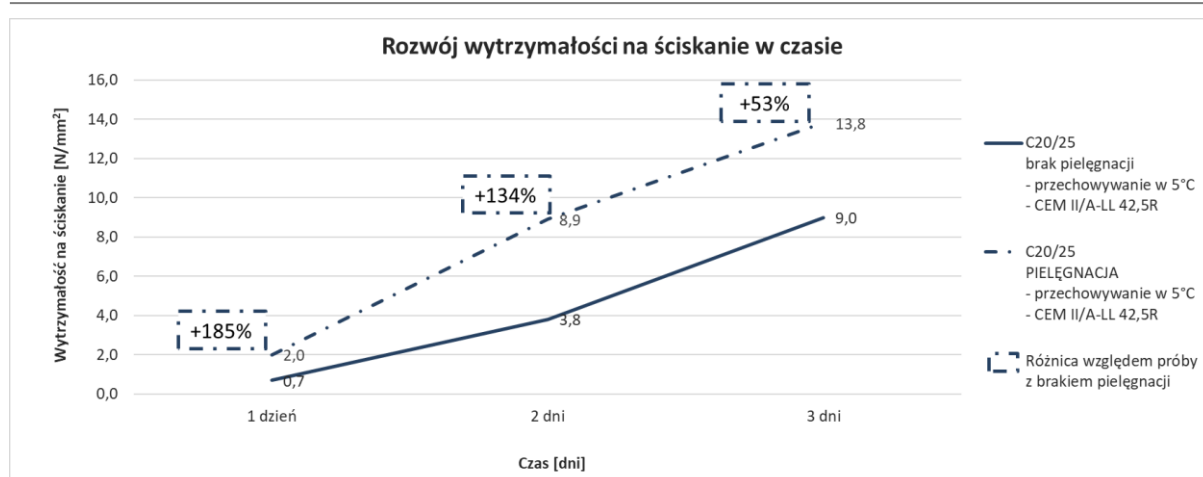
Próbki na CEM II/A-LL 42,5R, które zostały poddane pielęgnacji uzyskały najlepszy wynik wytrzymałościowy po 3 dniach spośród wszystkich wykonanych modyfikacji oraz względem „C20/25 – pielęgnacja zgodnie z normą PN-EN 12390-2:2019-7”[Rys. 2].



Rys. 9. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od przyjętej modyfikacji mieszanki (pielęgnacja mieszanki wzorcowej)



Rys. 10. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od przyjętej modyfikacji mieszanki (pielęgnacja mieszanki z redukcją w/c)



Rys. 11. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od przyjętej modyfikacji mieszanki (pielęgnacja mieszanki wykonanej na CEM II/A-LL 42,5R)

3. Podsumowanie i wnioski

Metody dzięki którym beton może osiągnąć deklarowane właściwości, w trakcie prowadzenia prac w niskich, a nawet ujemnych temperaturach[5]:

- zmiana cementu w mieszance betonowej na wyższe klasy: np. 42,5; 52,5,
- zmiana cementu w mieszance betonowej z oznaczeniem „N” o normalnej wytrzymałości wczesnej, na „R”, cement o wysokiej wytrzymałości wczesnej,
- zwiększenie ilości cementu w m^3 ,
- dodanie do mieszanki betonowej właściwych dla danej konstrukcji domieszek powodujących przyspieszenie wiązania i twardnienia mieszanki betonowej,
- zmniejszenie współczynnika W/C poprzez zastosowanie odpowiednich domieszek do mieszanki betonowej,
- podgrzewanie składników mieszanki betonowej (z wyjątkiem cementu) do odpowiedniej temperatury, w celu uzyskania określonej temperatury mieszanki betonowej, w chwili jej układania,
- osłanianie elementów lub całej konstrukcji materiałami ciepłochronnymi w celu zachowania ciepła w mieszance betonowej, ułożonej w deskowaniu lub w formie, przez okres niezbędny do uzyskania przez beton pełnej mrozoodporności,
- wykonanie robót betonowych w pomieszczeniach zamkniętych ogrzanych lub w ciepłakach stałych albo przesuwnych, chroniących przed mrozem i wiatrem.

4. Literatura

- [1] PN-EN 934-2+A1:2012 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Część 2: Domieszki do betonu – Definicje, wymagania, zgodność, oznakowanie i etykietowanie
- [2] PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
- [3] PN-EN 12390-2:2019-07 Badania betonu – Część 2: Wykonanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych

- [4] prof. Dr hab. Inż. Janusz Szwabowski, Aktualne problemy technologii robót betonowych, Monografie Technologii Betonu Dni Betonu
- [5] Lafarge, Betonowanie i pielęgnacja betonu w obniżonych temperaturach

XIII
KONFERENCJA

DNI BETONU 2025

13-15 października 2025



DNI
BETONU
2025
TRADYCJA I NOWOCZESNOŚĆ

www.dnibetonu.com



PARTNERZY PROGRAMOWI



SPONSORZY / FIRMY



PATRONAT MEDIALNY

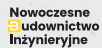
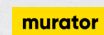
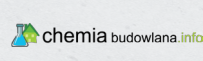


www.bta-czasopismo.pl



SCAN ME

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