

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.

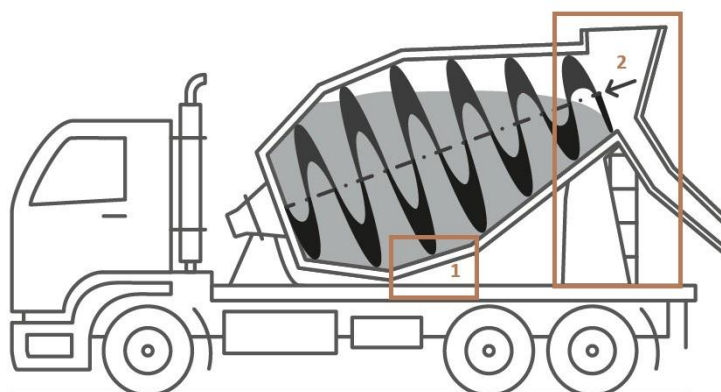
Abstract

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

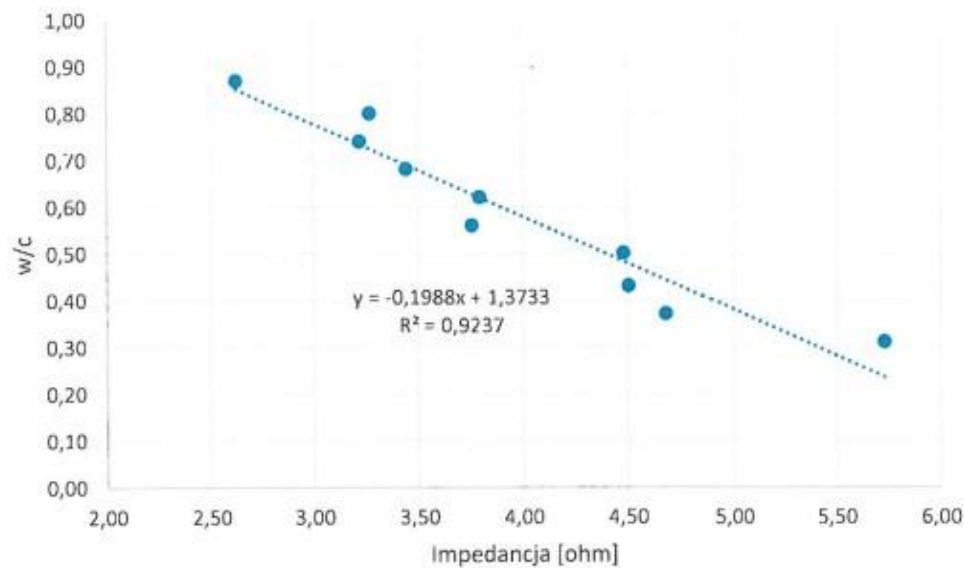
Pierwotnie planowano dokonywać pomiaru rezystancji elektrycznej mieszanki betonowej celem określania stosunku w/c oraz zawartości kruszyw. Znacznie lepszym rozwiązaniem okazało się dokonywanie pomiaru impedancji elektrycznej mieszanki betonowej. Pomiar rezystancji dla prądu stałego powoduje nasilenie 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 betonowozie. 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.

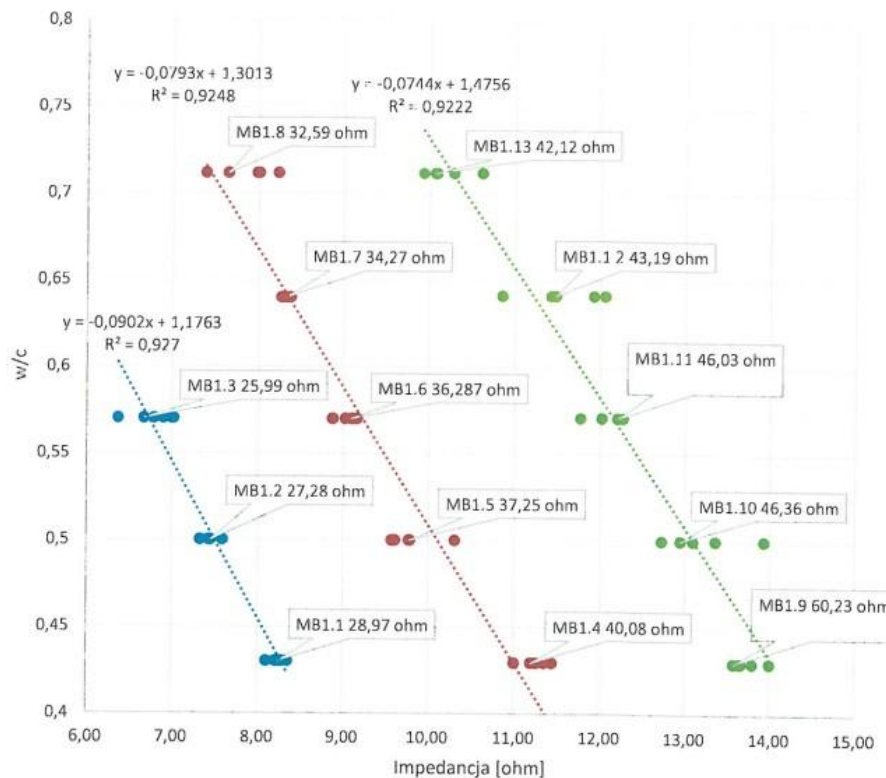
Poniżej przedstawiono wyniki badań dla zoptymalizowanych parametrów celem minimalizacji ww. zjawisk. Na Rys. 2.1 przedstawiony wyniki badań impedancji elektrycznej czystego zaczynu cementowego w zakresie jednego rodzaju cementu



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.

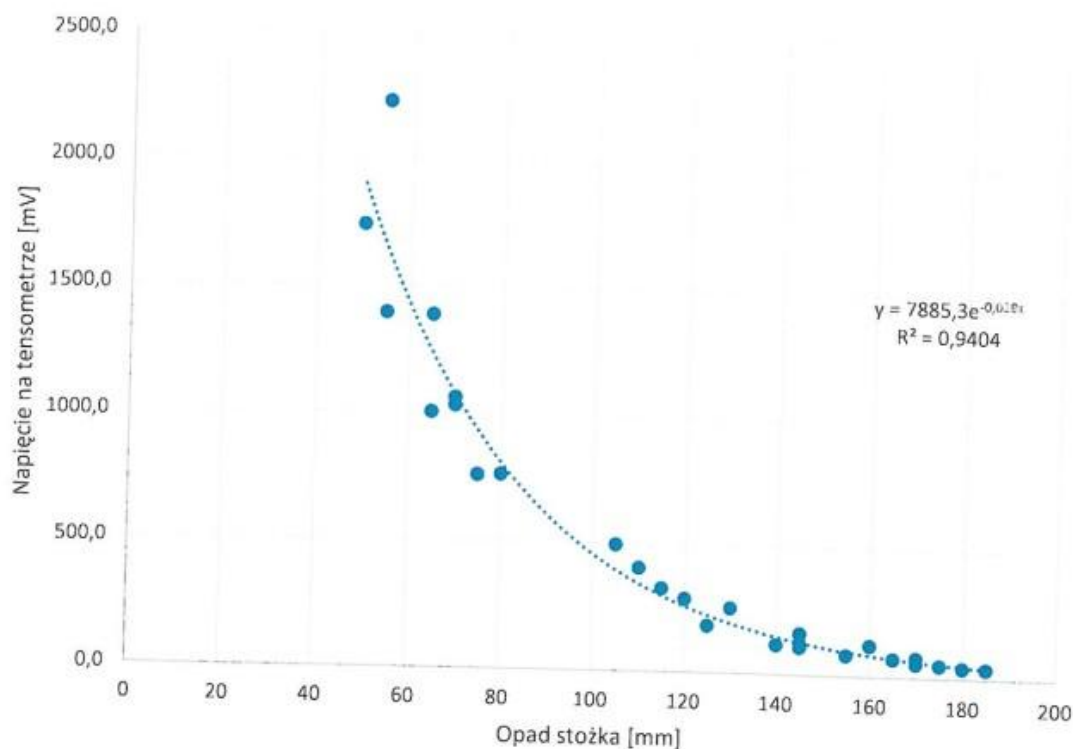
3. Badania konsystencji mieszanki betonowej

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.

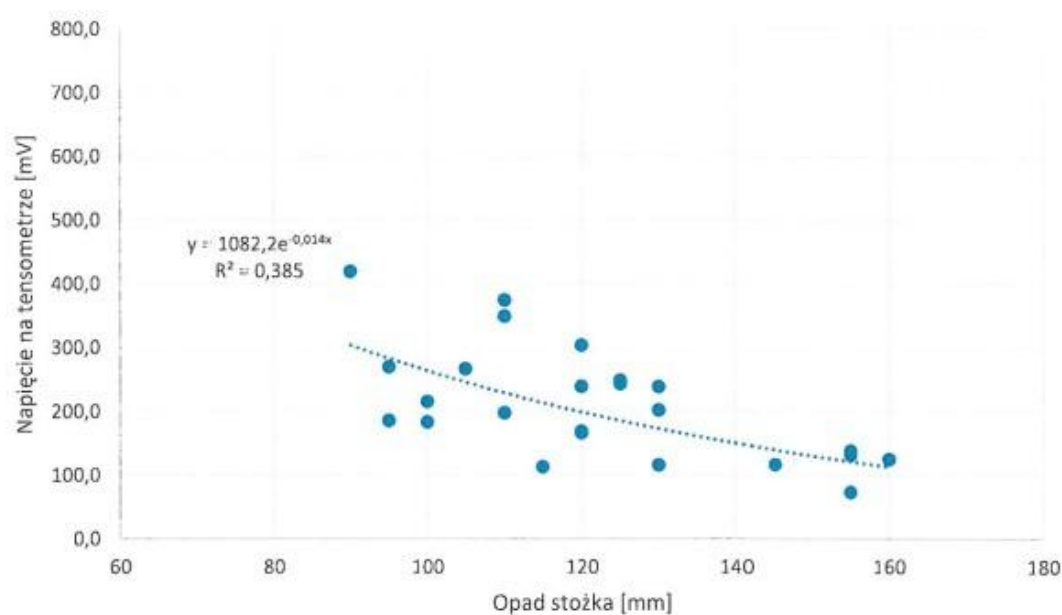
Na rys. 3.1 przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Siły oporu przedstawiono poprzez napięcie na wyjściu z sensora tj. po wzmocnieniu oraz korekcie temperaturowej.

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.

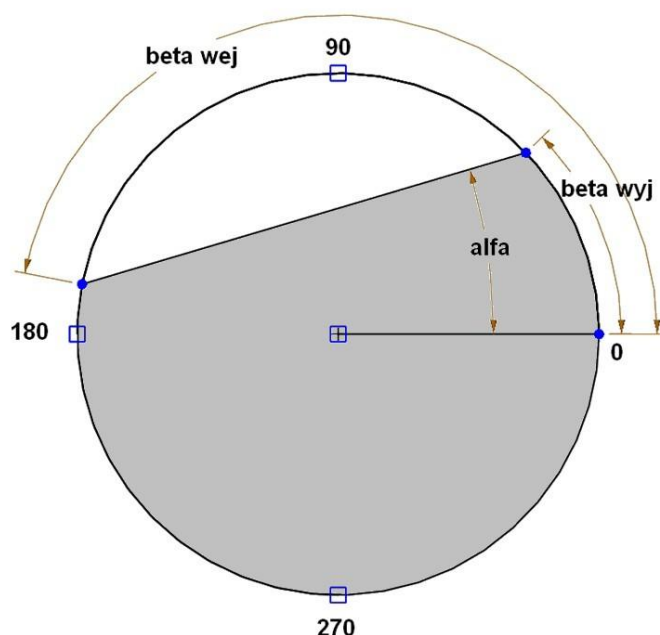


Rys. 3.2 Zależność pomiędzy siłami oporu ruchu, a konsystencją mieszanki betonowej w warunkach rzeczywistych.

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.

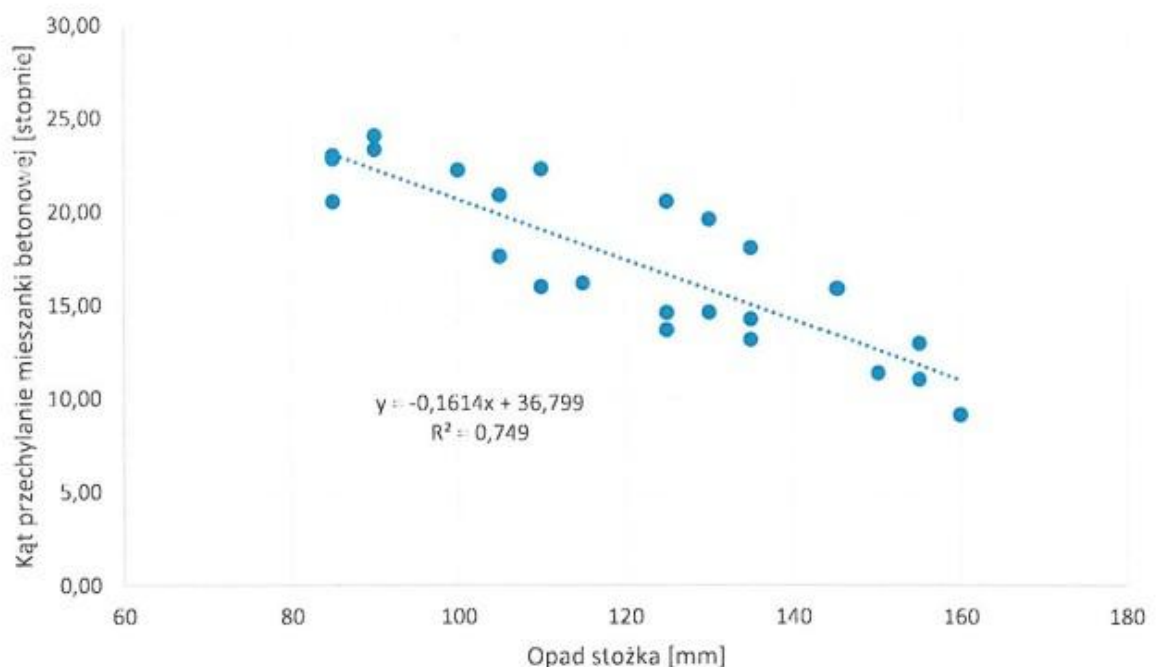
3.2. Badanie konsystencji mieszanki betonowej za pomocą czujnika pomiaru kąta wychylenia mieszanki betonowej

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. Zadać 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. Znać 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 przyśpieszeniomierzy. 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.

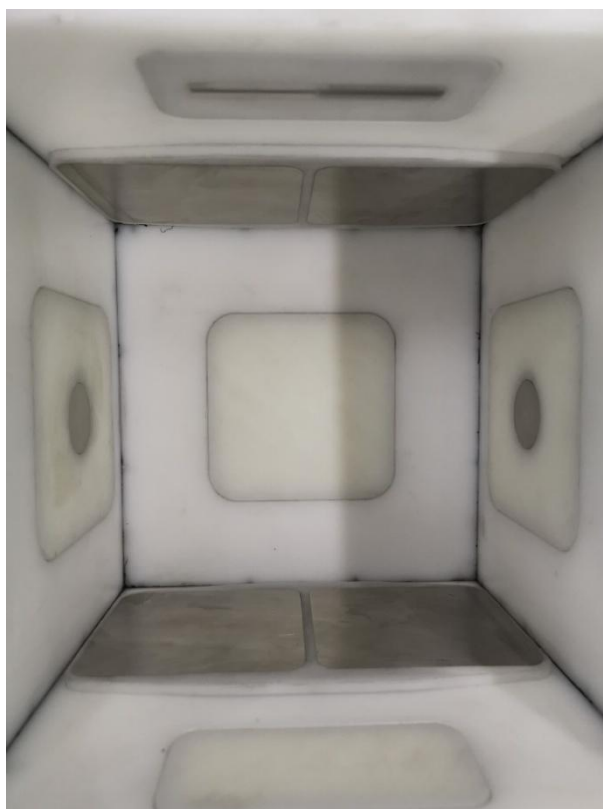
C. Za pomocą pomiaru kąta wychylenia mieszanki betonowej wykonanego przy użyciu skonstruowanego urządzenia oraz za pomocą pomiaru objętościowej zawartości powietrza mieszanki betonowej dokonanej przy użyciu porozymetru można dosyć dokładnie wyznaczyć konsystencję mieszanki betonowej wyznaczonej jako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

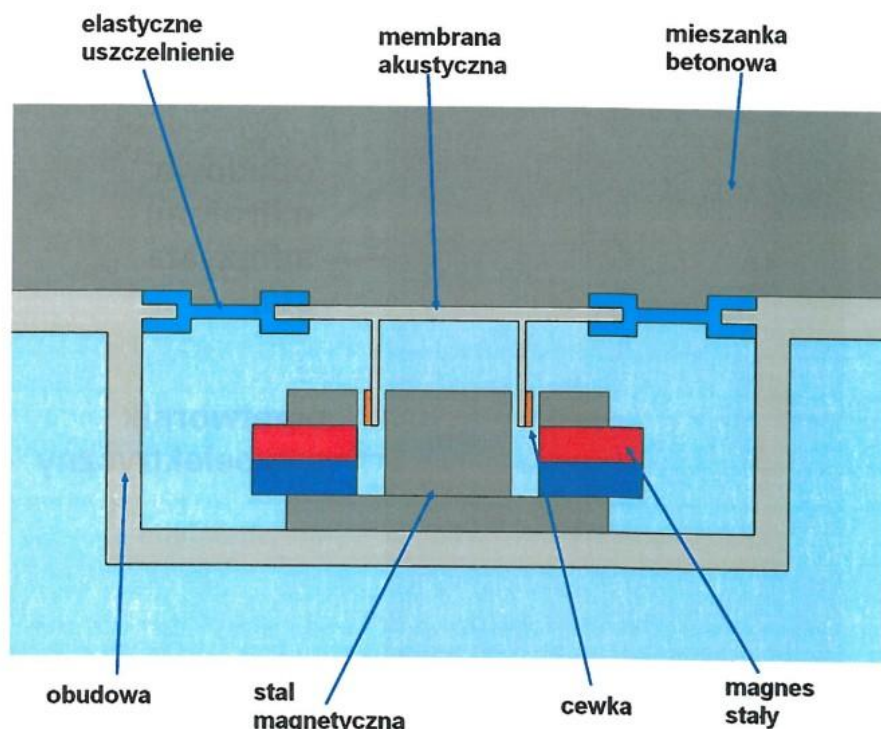
4.2. Badanie objętościowej zawartości powietrza w mieszance betonowej za pomocą pomiaru parametrów propagacji fal w zakresie słyszalnym z wykorzystaniem rozpoznawczego urządzenia laboratoryjnego

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.

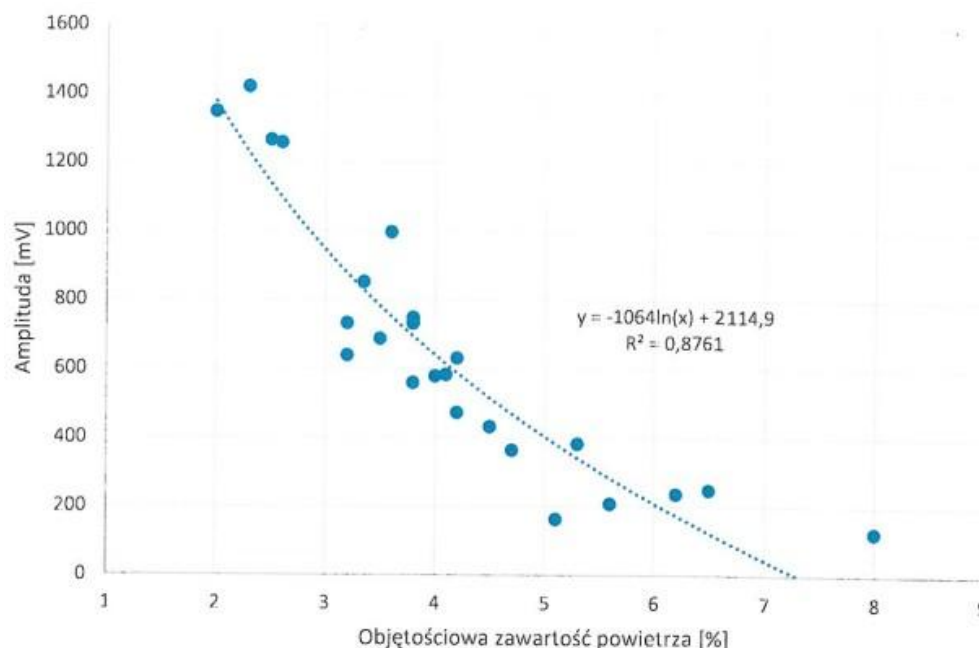
Na rys. 4.1 przedstawiono budowę jednej z pierwszej wersji nadajnika wibroakustycznego.



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.

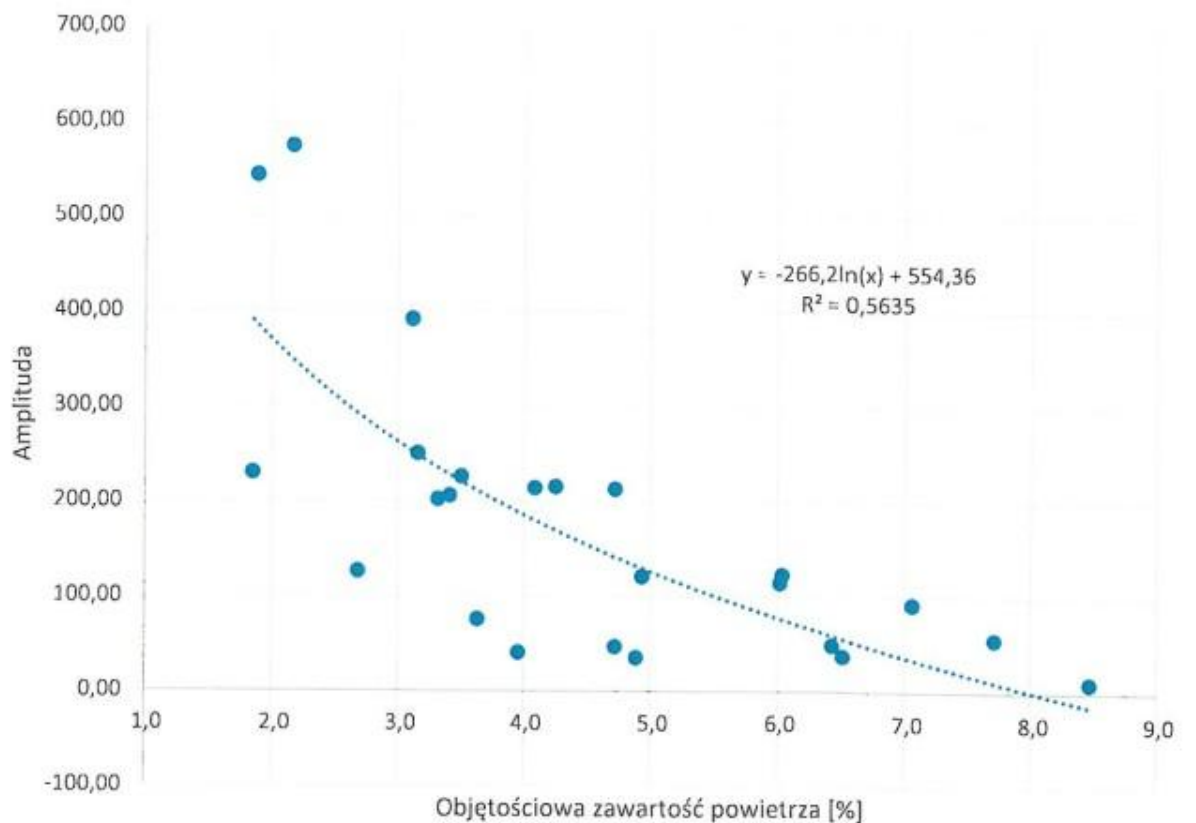
Urządzenie laboratoryjne posiadało wiele cech, które uniemożliwiały jego zastosowanie w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Odbiornik sensora laboratoryjnego był zbyt delikatny do użytku w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, ponieważ jego konstrukcja była zaprojektowana, w taki sposób, aby był 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].



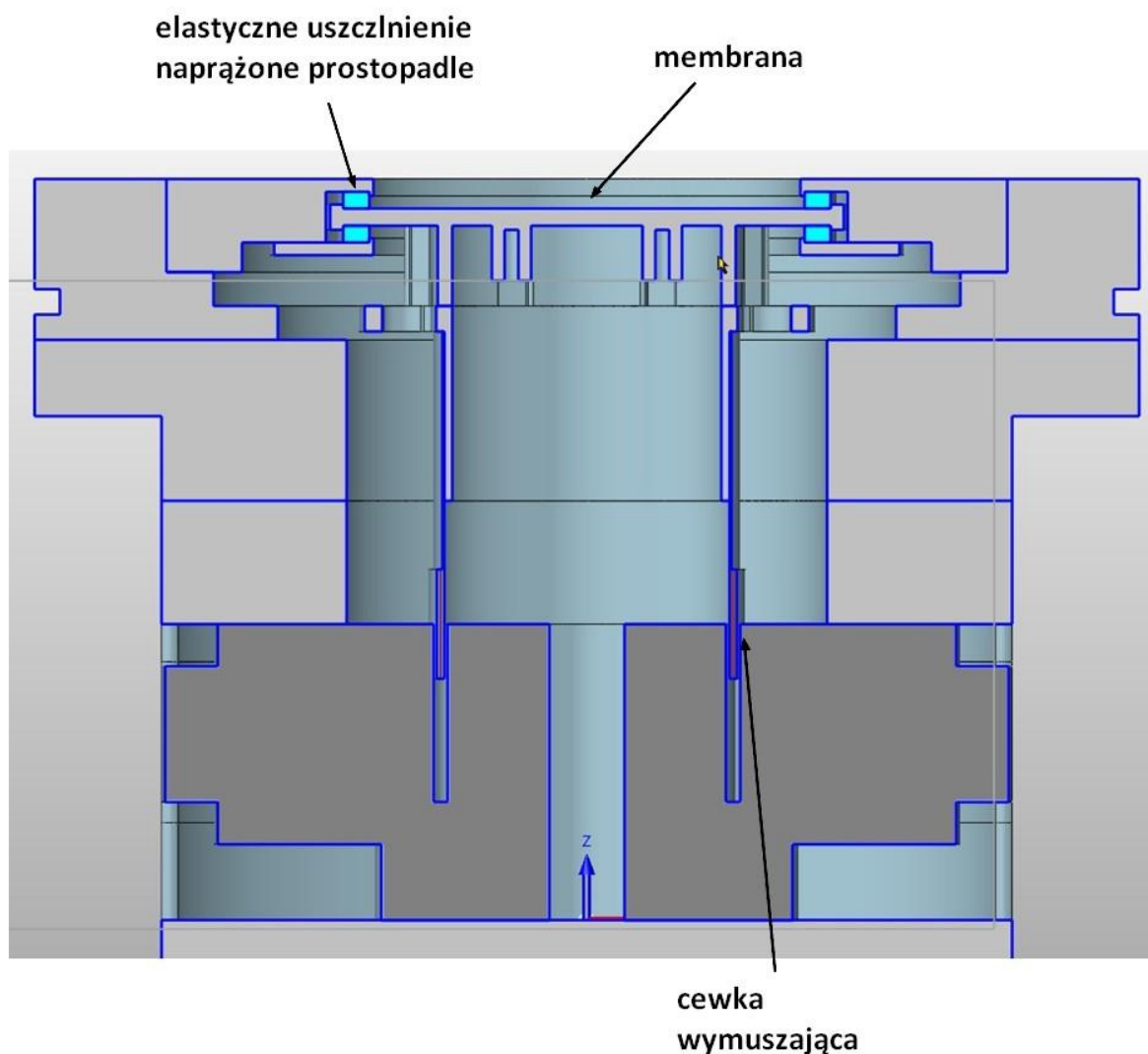
Rys 4.3 Zależność pomiędzy objętościową zawartością powietrza, a amplitudą drgań w warunkach zbliżonych do rzeczywistych z sensorem wyposażonym w nadajnik z równolegle naprężonym uszczelnieniem oraz analogicznie zbudowanym odbiornikiem wyposażonym w przyspieszeniomierz.

Charakterystyka objętościowej 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 mieszką 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.

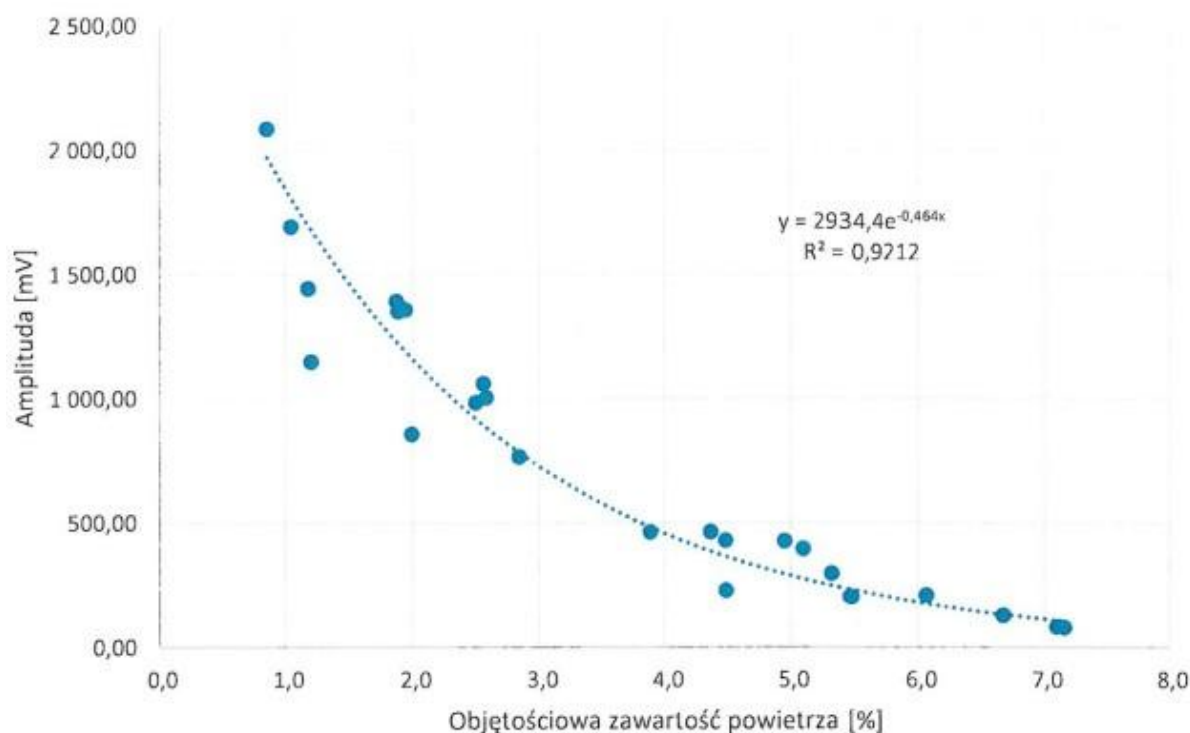
Na Fot. 4.2 Przedstawiono zewnętrzny widok na membranę sensora wibroakustycznego.



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

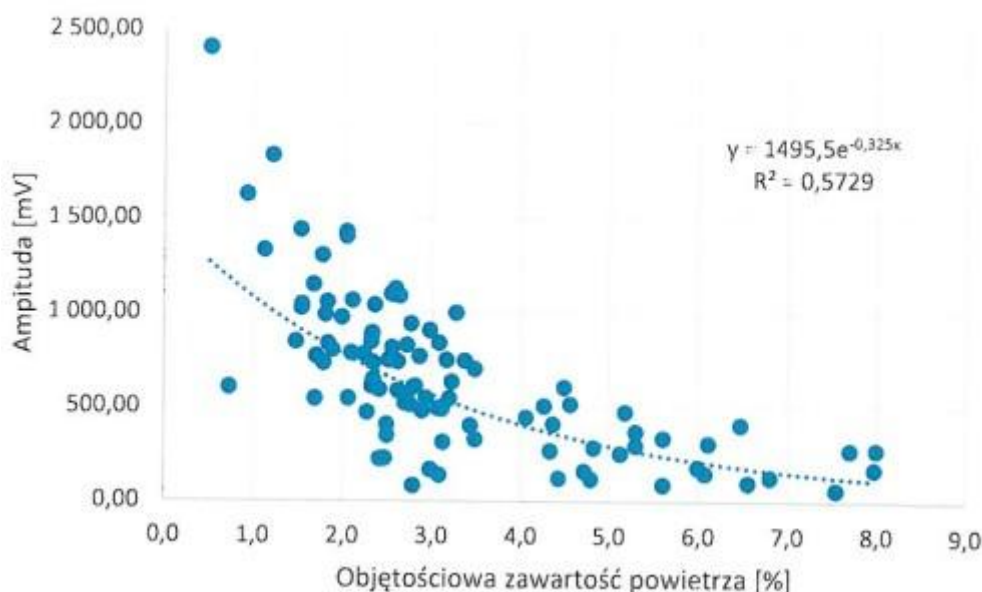
Wstępne naprężenie prostopadle pozwoliło na zachowanie szczelności sensora oraz znacznie usprawniło dynamikę pracy nadajnika. Kolokwialnie mówiąc wstępnie „ściśnięte” uszczelnienia pozwala na zmagazynowanie energii, zaś pod wpływem wymuszenia z jednej strony następuje jego jeszcze większe ściśnięcie, 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 zanieczyszczenia 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