

## Załącznik A – Sprawozdanie merytoryczne

Skład zespołu wykonawców projektu badawczego własnego  
nr. 4664/B/T02/2010/38 (nr. rej. N N505 466438).

**Kierownik projektu:** dr inż. Krzysztof Grudzień

**Wykonawcy:**

prof. dr hab. inż. Dominik Sankowski  
dr inż. Zbigniew Chaniecki  
dr inż. Andrzej Romanowski  
dr inż. Maciej Niedostatkiewicz  
(Politechnika Gdańska, Katedra Podstaw  
Budownictwa i Inżynierii Materiałowej)  
dr inż. Robert Banasiak  
dr inż. Radosław Wajman  
mgr inż. Bartosz Matusiak  
mgr inż. Tomasz Jaworski (doktorant)  
mgr inż. Jakub Betiuk (doktorant)

**Pomoc techniczna:**

Mariola Martynowska  
mgr Edyta Orłowska-Zientalak  
mgr Marcin Maj  
Zbigniew Jankowski

## I. Cel projektu

Niniejszy raport dotyczy badań naukowych prowadzonych w ramach projektu badawczego własnego MNiSW pt. „Nieinwazyjna metoda pomiaru dynamiki przemysłowych procesów przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich”.

**Celem projektu było opracowanie metody pomiarowej przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich w silosach o dużych rozmiarach. System pomiarowy bazuje na informacjach pobieranych z przemysłowego tomografu pojemnościowego (ang. *Electrical Capacitance Tomography – ECT*).**

Przedmiotem prac prowadzonych w ramach projektu, były badania przepływów grawitacyjnych materiałów sypkich podczas rozładowywania zbiornika - silosu. **W tym celu autorzy projektu zbudowali skomputeryzowany system pomiarowy do nieinwazyjnego monitorowania i diagnozowania procesów przepływów grawitacyjnych materiałów sypkich w skali przemysłowej.**

Przykładem przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich jest proces rozładowywania zbiornika - silosu, przechowującego materiał sypki. Charakterystyczną cechą najważniejszych procesów występujących w trakcie eksploatacji silosów – procesu napełniania oraz procesu rozładowywania – jest zmienność porowatości używanego materiału sypkiego. **Monitorowanie zmian porowatości** podczas tego typu przepływów (gaz/materiał sypki) **jest niezwykle istotne** dla celów projektowania i kontroli systemów transportu grawitacyjnego **w wielu gałęziach przemysłu**, m.in. chemicznym, spożywczym czy farmaceutycznym do składowania i dozowania w procesach produkcji granulatów i proszków.

**Prace badawcze podjęte przez autorów projektu związane są z potrzebą zastosowania nowoczesnych technik pomiarowych, opartych na zaawansowanych technologiach informatycznych, do monitorowania stanu procesu przepływu materiałów sypkich.** Dotychczasowa współpraca wykonawców projektu z Katedrą Podstaw Budownictwa i Inżynierii Materiałowej z Politechniki Gdańskiej kierowaną przez Profesora Jacka Tejchmana, reprezentowaną w zespole niniejszego projektu przez dr. inż. Macieja Niedostatkiwicza, zaowocowała wspólnymi publikacjami naukowymi, opisującymi przepływ grawitacyjny w modelach silosów przy pomocy technik tomograficznych. Jednakże dopiero zastosowanie tomografii w systemach kontroli przepływu materiałów sypkich w silosach o dużych rozmiarach stanowić będzie istotny wkład w rozwój nieinwazyjnych metod dla aplikacji przemysłowych.

Zjawiska fizyczno-chemiczne, zachodzące podczas opróżniania zbiorników na materiał sypki, stanowią poważny problem będąc źródłem wielu zagrożeń zarówno dla wydajności jak i bezpieczeństwa procesu. Przekroczenie bezpiecznego zakresu zmian koncentracji materiału w trakcie rozładunku silosu spowodować może niebezpieczną w skutkach interakcję materiału z konstrukcją silosu. **Znajomość rozkładu przestrzennego koncentracji struktur materiału sypkiego jest bardzo istotna ze względu na pojawiające się naprężenia, które mogą doprowadzić do degradacji materiału oraz zbiornika, jak również do katastrof.** Sytuacje takie mają miejsce w przypadku, gdy konstrukcje dużych systemów silosów nie wytrzymują naprężeń generowanych przez oddziaływanie przepływającego materiału na ściany silosów. W tym kontekście szczególnie istotna jest analiza interakcji przepływającego materiału z konstrukcją zbiornika, a w związku z tym zachodzi konieczność monitorowania zmian poziomu koncentracji materiału w trakcie rozładunku i napełniania silosów. Monitorowanie jest prowadzone w celu projektowania i utrzymania bezpiecznej eksploatacji silosów, a może się odbywać dzięki pomiarom poziomu zjawisk dynamicznych występujących podczas rozładunku.

Ze względu na powyżej opisane problemy istotnym staje się pomiar zmian porowatości materiału, jako że porowatość jest parametrem bezpośrednio odzwierciedlającym zmiany struktury przestrzennego systemu drobin materiału sypkiego, spowodowane różnymi zjawiskami. Pomiar porowatości jest zasadny zarówno dla materiałów w trakcie rozładowywania zbiorników, jak również podczas długotrwałego przechowywania w nich materiału sypkiego. Rozkład porowatości materiałów w zbiornikach, często o różnych kształtach, wymiarach czy szorstkości ścian silosu, jest decydujący w odniesieniu do wyznaczania naprężeń występujących w zbiornikach. Natomiast wizualizacja przestrzennego rozkładu porowatości

materiału pozwala analizować i wyznaczać napór materiału na ściany zbiornika, a także wykrywać pojawiające się niebezpieczeństwo. Dokładna analiza rozkładu przestrzennego materiału pozwoli diagnozować niepożądane zjawiska i w odpowiedni sposób na nie reagować. **W celu zobrazowania rozkładu koncentracji materiału sypkiego oraz jej zmian w projekcie zastosowano pojemnościową elektryczną tomografię procesową ECT.** Elektryczna tomografia pojemnościowa charakteryzuje się wysoką rozdzielczością czasową pomiarów, co czyni ten typ narzędzia pomiarowego odpowiednim do badania dynamicznych procesów przemysłowych. Inną podstawową zaletą tej techniki jest jej nieinwazyjność. W dotychczasowych zastosowaniach, wizualizacja rozkładu medium w nieprzezroczystych naczyniach przy pomocy tomografii ECT była notowana zwykle do zbiorników o średnicy od kilku do kilkudziesięciu centymetrów. Natomiast **przygotowany w ramach niniejszego projektu badawczego system diagnostyczny**, opierający się na danych pochodzących z tomografu ECT wsparty dodatkowo klasycznymi metodami pomiarowymi takimi jak wagi tensometryczne i akcelerometry, **umożliwia dokonanie pomiaru przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich w zbiornikach o znacznie większym rozmiarze niż miało to miejsce we wcześniej prowadzonych badaniach.** Zastosowanie dużego **rozmiaru skonstruowanych czujników pomiarowych ECT** do wizualizacji rozkładu materiału wewnątrz silosów **stanowi istotną wartość badawczą prowadzonego grantu.** Skonstruowane stanowisko badawcze zbiorników w połączeniu z opracowywanymi czujnikami pomiarowymi umożliwiają prowadzenie prac badawczych, których efektem będzie zastosowanie tomografii ECT w przemysłowych systemach kontroli procesów na szerszą skalę niż dotychczas.

Głównym założeniem prowadzonych prac badawczych było opracowanie nowatorskich czujników pomiarowych ECT oraz przeprowadzenie analizy własności metrologicznych proponowanego rozwiązania systemu pomiarowego w kontekście przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich. **Nowością jest opracowanie metody pomiarowej pozwalającej na pomiar rozkładu materiału sypkiego w różnych obszarach silosu w części czujnika pomiarowego ECT.** Podczas badań zastosowano **rozwiązanie uwzględniające wizualizację rozkładu materiału sypkiego w formie zrekonstruowanego obrazu 2D (2D ECT), jak również w formie obrazu 3D (3D ECT) dla obszaru przyściennego silosu.** Użyty system został wyposażony w dodatkowe elementy, które w znaczący sposób rozbudowały możliwości pomiarowe opracowanej metody. Wagi tensometryczne oraz zestaw układów akcelerometrycznych umożliwiły zbudowanie kompleksowych narzędzi do diagnostyki stanu procesu rozładunku silosu. **System monitoringu on-line został zaimplementowany w środowisku LabVIEW. Komunikacja z zestawem układów akcelerometrycznych dokonana została poprzez sieć przemysłową Ethernet.** Część programistyczna służąca do **projektowania czujników oraz analizy czułości pomiarowej układu pomiarowego ECT zaimplementowana została w języku C++ oraz C#.** Aplikacje pracują w trybie off-line w środowisku Windows. Opracowane stanowisko wyposażone jest również w bezprzewodowy moduł komunikacji człowiek – komputer, **umożliwiający podgląd stanu procesu przy pomocy urządzeń mobilnych PDA.** Przeprowadzona analiza danych pomiarowych dokonana została zarówno w formie off-line jak i on-line.

W celu lepszego zrozumienia zmian koncentracji materiału sypkiego przeprowadzono również pomiar przepływu grawitacyjnego materiału sypkiego w prostokątnym modelu silosu przy pomocy systemu tomografii promieni X. Badania modelu silosu oraz odpowiednio **przeskalowanego rozmiaru materiału sypkiego** pozwoliły w odpowiedni sposób dopasować czujnik ECT do przepływu kominowego. Dodatkową zaletą tych pomiarów było lepsze zrozumienie i zinterpretowanie danych pomiarowych ECT dotyczących przepływu grawitacyjnego w silosach do przepływu kominowego.

## **II. Zakres zrealizowanych badań naukowych**

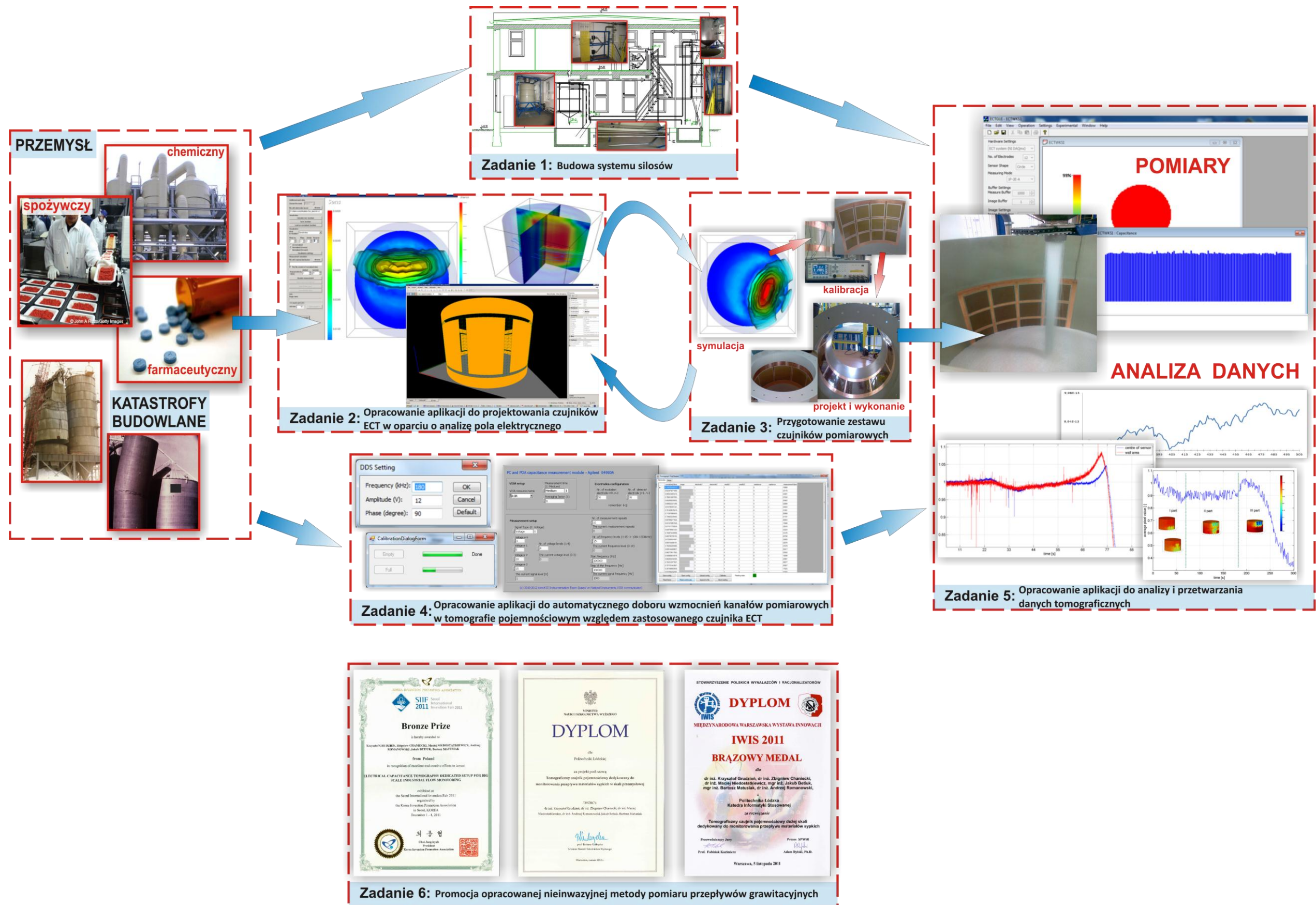
Prowadzone w ramach projektu prace badawcze dotyczyły przede wszystkim **opracowania komputerowego systemu diagnostycznego** w głównej mierze opartego na tomografii pojemnościowym, umożliwiającym dokonanie w sposób nieinwazyjny wizualizacji zmian koncentracji materiału sypkiego

podczas rozładowywania silosów. Istotnym elementem prac było także **opracowanie czujników ECT dedykowanych do pomiaru obiektów dużych rozmiarów**. Weryfikacja opracowanych czujników pomiarowych ECT odbyła się w trakcie przeprowadzanych eksperymentów przepływu grawitacyjnego materiału sypkiego w silosach o różnej geometrii. Ważną częścią prac prowadzonych w ramach niniejszego projektu było **zbudowanie unikatowego stanowiska badawczego**, w skład którego oprócz narzędzi pomiarowych (tomografu ECT, wag tensometrycznych, układów akcelerometrycznych) wchodzi system dwóch **silosów skali przemysłowej**, pomiędzy którymi transport materiału odbywa się przy pomocy **specjalnej instalacji do przepływu pneumatycznego** materiału sypkiego.

Oddzielną część prac stanowiło **opracowanie oprogramowania do projektowania czujników ECT wraz z analizą czułości pomiarowej, rekonstrukcji obrazów tomograficznych oraz przetwarzaniem danych pomiarowych**. W tej części badań uwzględnione zostały elementy akwizycji danych pomiarowych pochodzących z tomografu, wag oraz układów akcelerometrycznych. Projekt skomputeryzowanego systemu pomiarowego został wykonany według następującego porządku:

1. Projekt i budowa systemów silosów.
2. Przygotowanie oprogramowania wspierającego projektowanie czujników ECT.
3. Projektowanie i konstrukcja czujników pomiarowych ECT.
4. Projekt i wykonanie układu pomiaru drgań konstrukcji silosu na podstawie akcelerometrów.
5. Moduły akwizycji danych pomiarowych z tomografu pojemnościowego, systemu wag oraz akcelerometrów.
6. Przygotowanie oprogramowania do rekonstrukcji obrazów i analizy danych pomiarowych oraz obrazów tomograficznych.
7. Przygotowanie oprogramowania do przetwarzania danych z układów akcelerometrycznych oraz wag tensometrycznych.

**Prace badawcze zrealizowane zostały w Laboratorium Tomografii Procesowej im. Prof. Tomasza Dyakowskiego Politechniki Łódzkiej, w pomieszczeniach Katedry Informatyki Stosowanej PŁ.** W celu lepszego zobrazowania zakresu wykonanych prac oraz zależności między poszczególnymi zadaniami, przedstawiono je w formie diagramu, na którym zobrazowano poszczególne etapy przeprowadzonych czynności wraz z ich kolejnością wykonania (Rys. 1).



Rysunek 1. Zakres wykonanych prac w ramach projektu w formie diagramu zrealizowanych zadań

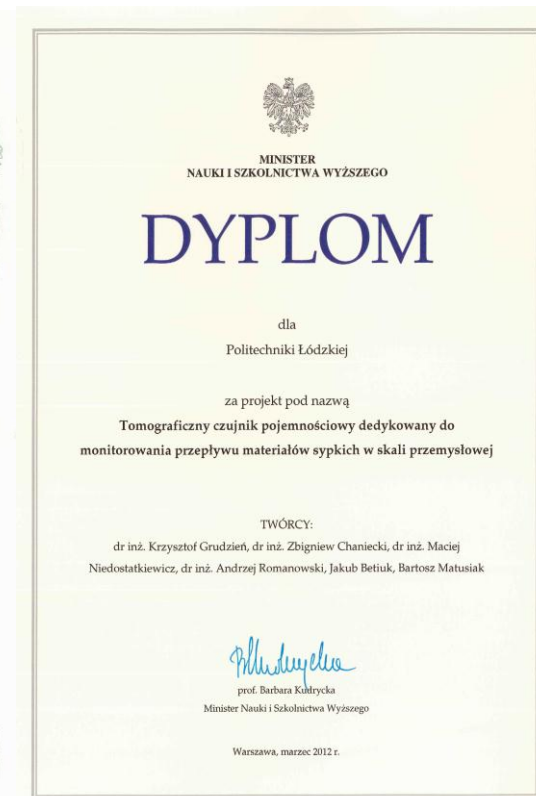
Dodatkowo, w ramach prowadzonych prac badawczych nawiązano współpracę z jednostką naukową z Uniwersytetu w Manchesterze UK – *The School Of Material Science*. Współpraca dotyczy zastosowania technik tomografii radiacyjnej do pomiaru zmian koncentracji materiału sypkiego w trakcie opróżniania silosu. Dzięki temu, możliwe było dokonanie serii eksperymentów pomiarowych z zastosowaniem tomografii rentgenowskiej. Pomiarzy zostały przeprowadzone przy użyciu najnowocześniejszych tomografów promieni X w Laboratorium im. Henry Moseley’a (The Manchester X-Ray Imaging Facility), a przedmiotem badań był przepływ grawitacyjny w prostokątnym modelu silosu. Opracowane metody analizy danych radiograficznych pozwoliły określić potrzeby wizualizacji przepływu kominowego w różnych obszarach silosu w celu monitorowania procesu rozładunku silosu. Opracowany algorytm analizy danych tomograficznych umożliwia analizę wpływu szorstkości ścian na rozmiar oraz zmianę koncentracji materiału w obszarze komina przepływu. Wyniki działania tego algorytmu przedstawione zostały podczas Międzynarodowego Sympozjum Tomografii Procesowej w Republice Południowej Afryki. Obecnie trwają prace nad artykułem do recenzowanego czasopisma z listy filadelfijskiej. Poniżej znajduje się lista artykułów opisujących wyniki prac badawczych wykonanych w trakcie trwania projektu:

1. Grudzień K., Chaniecki Z., Matusiak B., Romanowski A., Sankowski D., *Visualisation of granular material concentration changes, during silo discharging process, using ECT large scale sensor*, zgłoszony do zeszytu naukowego AGH, *Automatyka*, 2012.
2. Chaniecki Z., Grudzień Z., Jaworski T., Rybak G., Romanowski A., Sankowski D., *Diagnostic of gravitational solid flow based on weight and accelerometer signal analysis using wireless data transmission technology*, zgłoszony do zeszytu naukowego AGH, *Automatyka*, 2012.
3. Grudzień K., Chaniecki Z., Romanowski A., Wozniak P., Sankowski D., *Measurement System For Gravitational Solid Flow In Large-Scale Containers Using Tomographic Methods And Wireless Data Transmission Technology*, MEMSTECH'2012, IEEE, Polyana, Ukraina, kwiecień 2012
4. Grudzień K., Chaniecki Z., Romanowski A., Niedostatkiewicz M., Sankowski D., *ECT Image Analysis Methods for Shear Zone Measurements during Silo Discharging Process*, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Volume 20, Issue 2, Pages 337–345, 2012.
5. Laurent B., Grudzień K., Maire E. and Withers P.J., *Real-time study of silo discharging using a large-scale X-ray Imaging unit*, 6th International Symposium on Process Tomography, Cape Town (RPA).
6. Grudzień K., Chaniecki Z., Romanowski A., Betiuk J., Matusiak B., Sankowski D., *Monitorowanie przemysłowych systemów przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich w silosach o dużych gabarytach z użyciem tomografii ECT - badania wstępne*, *Automatyka*, T.15, z.3 s.561-570, 2011.
7. Grudzień K., Chaniecki Z., Romanowski A., Betiuk J., *Tomografia przemysłowa - narzędzie diagnostyki i monitorowania systemów przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich*, *Metrologia dziś i jutro*, Białystok, s.249-262, 2011.
8. Grudzień K., Niedostatkiewicz M., Chaniecki Z., Romanowski A., *Shear zone measurements based on ECT image analysis in slim hopper*, p. 210-218, 6th World Congress On Industrial Process Tomography (WCIPT). Chiny, 6-9.09.2010. Beijing, 2010.

**Realizacja niniejszego projektu naukowo-badawczego znacząco przyczyniła się do rozwoju Laboratorium Tomografii Procesowej PŁ oraz potencjału badań naukowych pracowników Katedry. Rezultaty badań zostały już dostrzeżone na wystawach wynalazków, gdzie prezentowane rozwiązanie *Tomograficzny czujnik pojemnościowy dużej skali dedykowany do monitorowania przepływu materiałów sypkich* zostało wyróżnione brązowymi medalami oraz Dyplomem Ministra (Rys. 2):**

- Brązowy Medal – Międzynarodowa Warszawska Wystawa Innowacji IWIS Warszawa 2011;
- Bronze Price - Seul International Invention Fair 2011.
- Dyplom Minister Nauki i Szkolnictwa Wyższego 2012.

Wyniki zrealizowanych w ramach projektu badań zostaną zamieszczone w rozprawach habilitacyjnych (dr. inż. Krzysztofa Grudnia oraz dr. inż. Zbigniewa Chanieckiego) jak również w przygotowywanych rozprawach doktorskich głównych wykonawców grantu (mgr. inż. Bartosza Matusiaka oraz mgr. inż. Jakuba Betiuka).



Rysunek 2. Wyróżnienia uzyskane w uznaniu wartości innowacyjnej opracowanych rozwiązań.



### III. Merytoryczny opis prac badawczych zrealizowanych w latach 2009 - 2012

Niniejszy rozdział przedstawia zrealizowane w ramach projektu etapy prac badawczych przedstawionych w części II niniejszego raportu oraz osiągnięte rezultaty wraz z dyskusją nad otrzymanymi wynikami. Przedstawiono poszczególne elementy zbudowanego systemu pomiarowego, system akwizycji danych pomiarowych, a także wyniki pomiarów, analizy i przetwarzania danych pomiarowych. Główny fragment opisu dotyczy analizy poprawności założeń projektu i konstrukcji czujnika ECT dużej skali, podlegający ocenie metrologicznej. Poszczególne podrozdziały dotyczą zakresu prac zrealizowanych w ramach poszczególnych zadań zaplanowanych we wniosku grantowym.

#### 1. Opracowanie i zbudowanie systemu przepływu grawitacyjnego w silosach

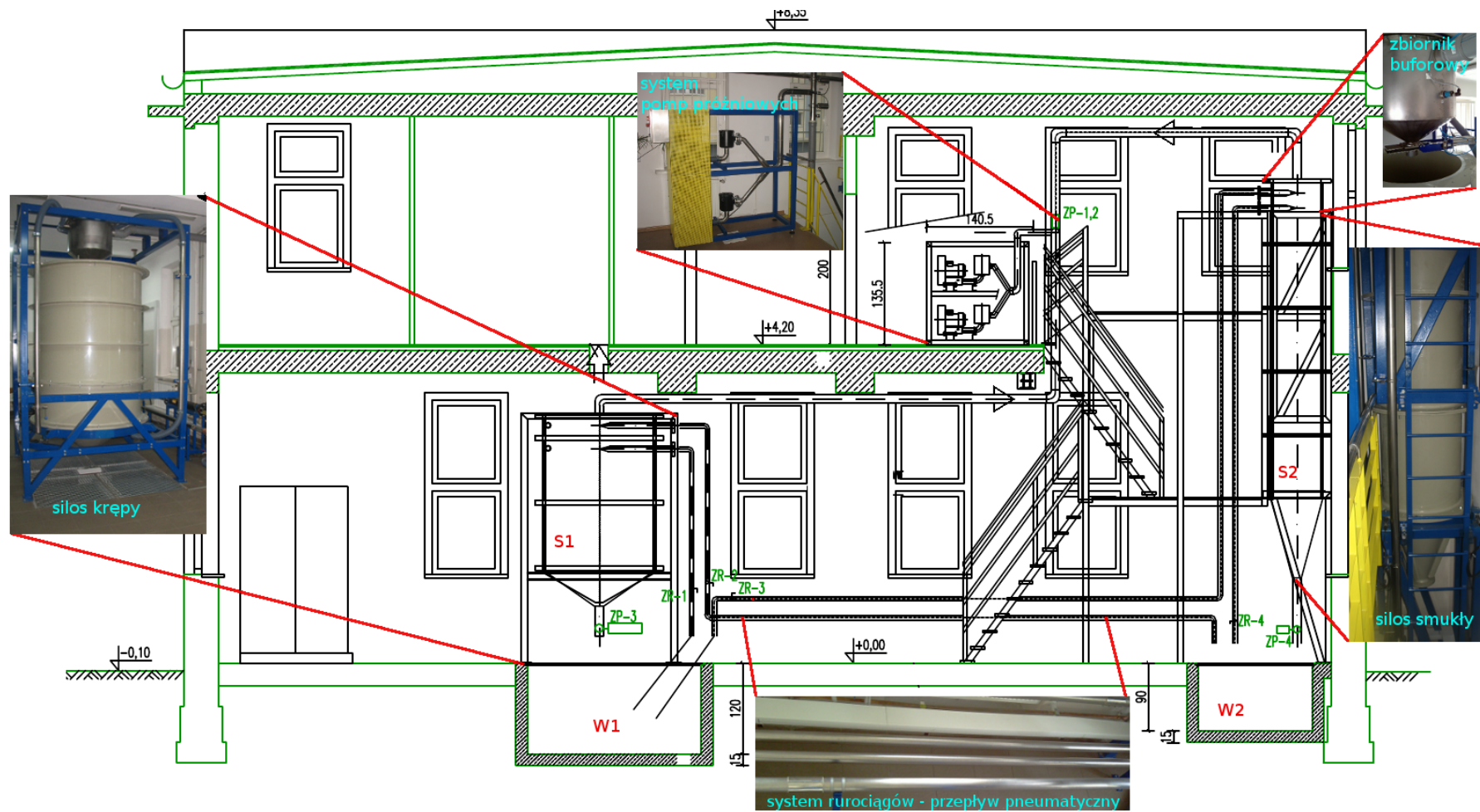
Pierwszym etapem prac badawczych było przygotowanie projektu systemów silosów i jego realizacja w Laboratorium Tomografii Procesowej PŁ. Przed przystąpieniem do prac budowlanych, wymaganych w celu posadowienia systemu silosów w laboratorium, wykonano projekt konstrukcji silosów. W związku z ograniczonymi możliwościami lokalowymi konieczne było opracowanie koncepcji rozmieszczenia silosów w sposób umożliwiający swobodny dostęp do ich konstrukcji. Dodatkowo system miał umożliwiać transport materiału pomiędzy silosami oraz zbiornikami pośredniczącymi w składowaniu materiału – w zależności od potrzeb w jednym, bądź drugim silosie. Dodatkowym elementem wchodzącym w skład systemu silosów były wagi tensometryczne, służące do pomiaru ciężaru materiału w zbiornikach oraz dodatkowe układy akcelerometryczne do pomiaru pulsacji konstrukcji silosów w trakcie ich rozładunku.

##### Szczegółowy plan prac projektowych systemu silosów obejmował:

1. projekt zbiorników buforowych;
2. projekt budowlany konstrukcji wsporczej silosów;
3. projekt silosu smukłego do pomiaru przepływu masowego;
4. projekt silosu krępego do pomiaru przepływu kominowego;
5. projekt systemu przepływu pneumatycznego materiałów sypkich pomiędzy zbiornikami buforowymi oraz silosami;
6. projekt systemu wag tensometrycznych;
7. projekt układów akcelerometrycznych;
8. projekt instalacji elektrycznej i sygnałowej.

Stanowisko eksperymentalno-pomiarowe przepływu grawitacyjnego w skali przemysłowej składa się z dwóch zbiorników głównych, silosów: S1, S2 o średnicach wewnętrznych 1,5 m (do pomiaru przepływu kominowego) oraz 0,7 m (do pomiaru przepływu masowego). Rysunek 3 przedstawia schemat rozmieszczenia instalacji z naniesionymi zdjęciami poszczególnych fragmentów najistotniejszych elementów systemu silosów ilustrujący ich rozmieszczenie oraz skalę. Pod każdym z silosów znajduje się zbiornik odbiorczy (W1, W2) zbierający materiał po wysypie z silosu. Zaprojektowana geometria zbiorników wykonanych z polipropylenu wymusza typ przepływu kominowego dla silosu S1 (silos krępy) oraz przepływu masowego dla silosu S2 (silos smukły). Na rysunku. 4 przedstawiono zwymiarowany szkic zaprojektowanych zbiorników. Istotną cechą opracowanej konstrukcji jest jej funkcjonalność i możliwość

rekonfiguracji. Zastosowanie segmentów polipropylenowych, z których zbudowano silosy, pozwala na nieskomplikowaną wymianę poszczególnych z nich, co może być szczególnie istotne w razie potrzeby wymiany części stożkowej silosu (zarówno w ramach niniejszego projektu, ale także w przypadku dalszych badań prowadzonych w przyszłości w oparciu o powstałą instalację). Możliwa jest także rekonfiguracja segmentów pomiarowych – zmiana miejsca montażu czujnika ECT. Konstrukcja silosu smukłego S2 wyposażona została w dwie dodatkowe części stożkowe różniące się innym kątem nachylenia ścian, a dodatkowe końcówki stożkowe charakteryzują się kątem nachylenia  $60^\circ$  oraz  $45^\circ$ . Silosy zaopatrzone są także w moduł zmiany rozmiaru otworu wylotowego, który może być sterowany przez osobę obsługującą silosy. W obu przypadkach rozmiar ten jest kontrolowany za pomocą zaworu stożkowego, opuszczanego przy pomocy aktuatora liniowego, którego położenie kontrolowane jest za pomocą aplikacji komputerowej.



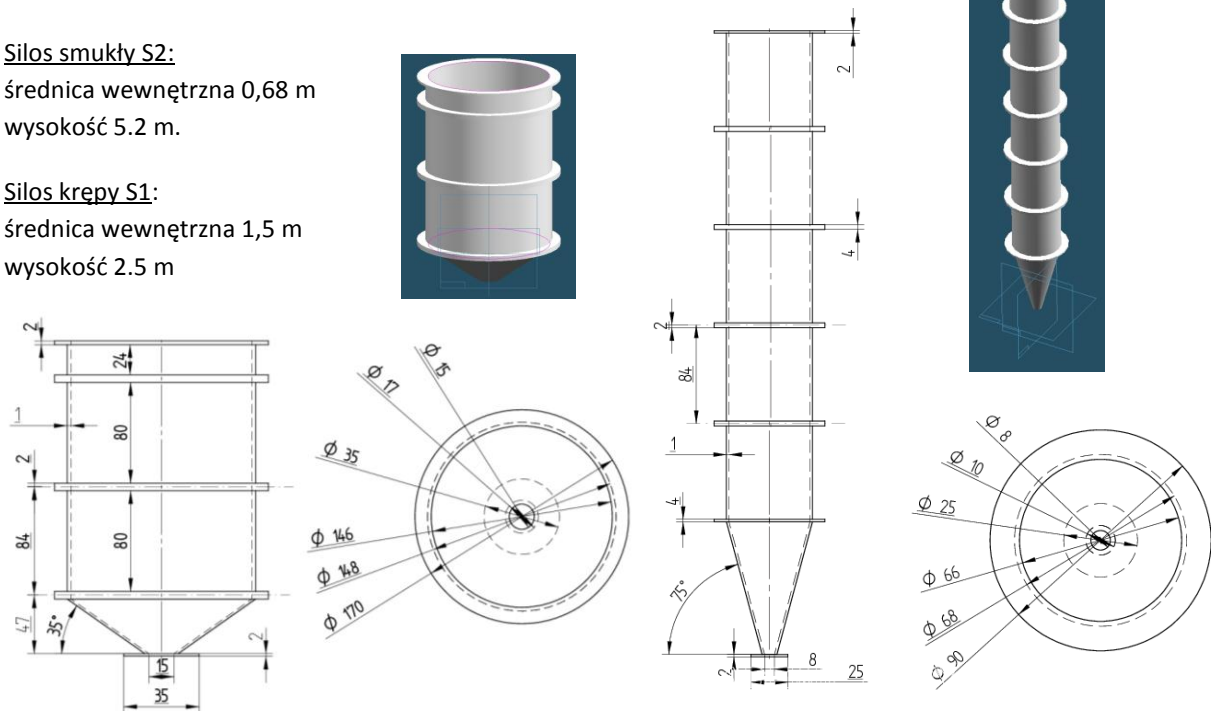
Rysunek 3. Schemat rozmieszczenia silosów do badań przemysłowych przepływów grawitacyjnych

Silos smukły S2:

średnica wewnętrzna 0,68 m  
wysokość 5.2 m.

Silos krępy S1:

średnica wewnętrzna 1,5 m  
wysokość 2.5 m

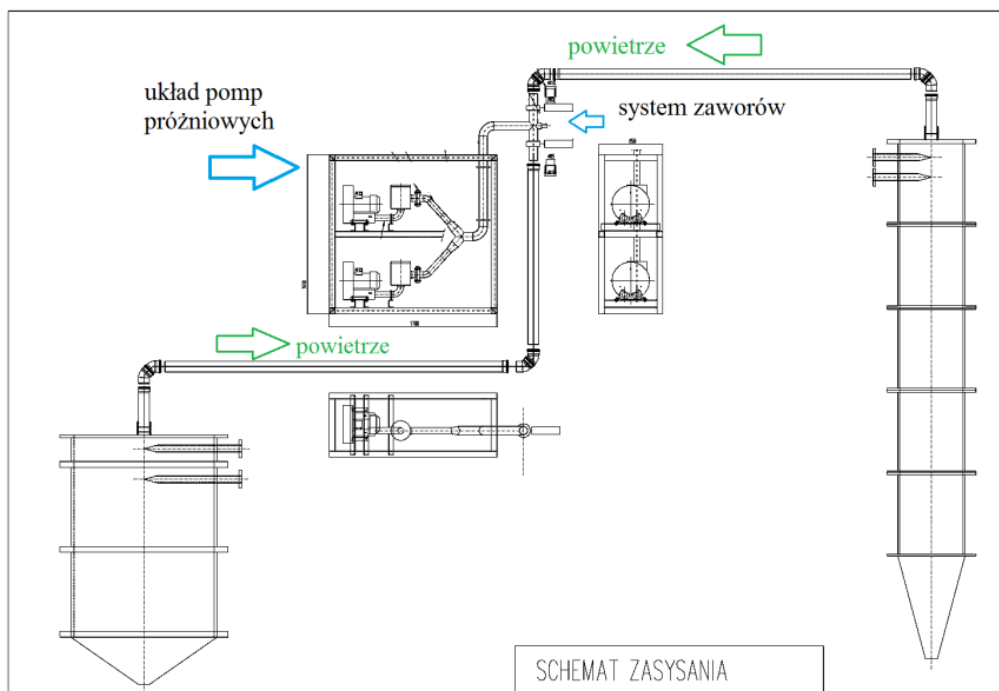


Rysunek 4. Projekt silosów do przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich: silos do przepływu kominowego S1, silos do przepływu masowego S2.

Obydwa silosy oraz zbiorniki odbiorcze bez systemu transportu materiału między nimi stanowiłyby oddzielne zestawy laboratoryjne. Takie rozwiązanie nie pozwoliłoby na kompleksowe badanie przepływu grawitacyjnego. Dlatego też konieczne stało się zaprojektowanie oraz wykonanie systemu transportu materiału. System przepływu materiału między silosami odbywa się przez zestaw 4 rurociągów, transportujących materiał w następujących możliwych kombinacjach:

- przepływ z zbiornika odbierającego W1 do silosu S1;
- przepływ z zbiornika odbierającego W1 do silosu S2;
- przepływ z zbiornika odbierającego W2 do silosu S2;
- przepływ z zbiornika odbierającego W2 do silosu S1;

Przygotowany w ten sposób system przepływu posiada dodatkową zaletę; pozwala na dokonanie eksperymentów pomiarowych dla dwóch różnych materiałów sypkich, np.: piasku oraz granulatu plastikowego, odseparowanych od siebie w zamkniętym systemie przepływu. Zastosowany rodzaj transportu granulatu w rurociągach oparty jest na tłoczeniu gazu jako nośnika (powietrza). Ten typ przepływu nazywany jest przepływem pneumatycznym (Neidigh, 2002; Arko i inni, 1999; Dyakowski i Jaworski, 2003). Przepływ powoduje powietrze płynące dzięki pojawieniu się różnicy ciśnienia między początkiem i końcem rurociągu (Jones i inni, 2002; Klinzing i inni, 1997). System transportu pneumatycznego może pracować w dwóch trybach – ssącym i ciśnieniowym. W projekcie ze względu na ograniczenia lokalowe związane z umiejscowieniem silosów zdecydowano się na tryb ssący. Rysunek 5 przedstawia ogólny schemat systemu transportu pneumatycznego w przygotowanym systemie przepływu.

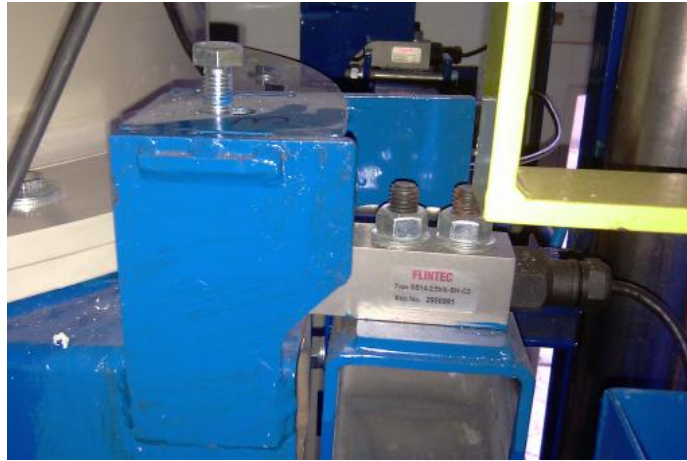


Rysunek 5. Schemat instalacji przepływu pneumatycznego w trybie ssącym (dodac buforowe).

Podciśnienie w rurociągu wytwarzane przy pomocy dwóch pomp próżniowych (podciśnienie rzędu 0.8 bar) zasysa materiał z punktu początkowego i transportuje go do miejsca końcowego rurociągu. Poziom wytworzonego podciśnienia wymusił wykonanie dodatkowych zbiorników buforowych znajdujących się nad silosami. Zbiorniki 80dm<sup>3</sup> zostały wykonane ze stali nierdzewnej, wyposażone w zawór dolny zamykający zbiornik buforowy w trakcie jego napełniania. Po napełnieniu ich materiałem sypkim, pobranym ze zbiorników odbiorczych zawór pneumatyczny zostaje otworzony i materiał napełnia silos. Odpowiednia sygnalizacja napełnienia zbiornika buforowego wyłącza system pomp, chroniąc przed przepiętniem zbiornika. Kontrola pomp próżniowych, zaworów stożkowych oraz zaworów pneumatycznych zamykających zbiorniki buforowe odbywa się z wykorzystaniem przygotowanej szafy rozdzielczej.

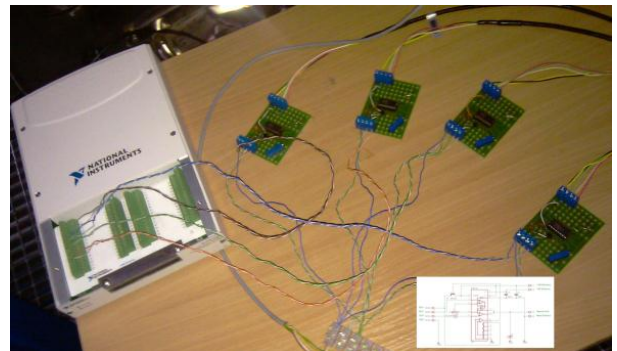
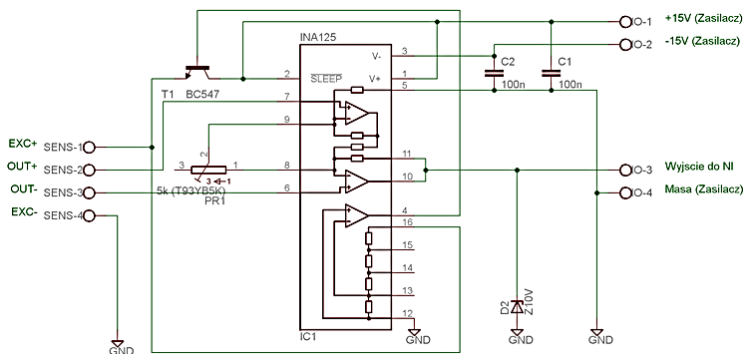
Elementami pomiarowymi wykonanymi w ramach zadania 1, kończącymi budowę stanowiska przepływu grawitacyjnego, są belki tensometryczne oraz układy akcelerometryczne. Konstrukcje wsporcze silosów – pierścienie stalowe – zostały wyposażone w belki tensometryczne, z których pochodzi informacja o ciężarze materiału znajdującego się w silosach. Zestaw 8 układów akcelerometrycznych dostarcza informacji na temat drgań konstrukcji silosu w punktach ich mocowania.

Rysunek 6 przedstawia fotografię zamontowanej belki firmy FLINTEC SB14. Belki wagowe mocowane są jednym końcem do konstrukcji stalowej obejmującej silos - punkt podparcia, natomiast miejsce przyłożenia siły umiejscowione jest na pierścieniu stalowym, na którym swobodnie jest zawieszony silos. Odczyt informacji z belek tensometrycznych (przypadają 4 na każdy silos) dostarcza wiedzy o ciężarze materiału w silosie, a także, po części, o nierównomiernym rozkładzie materiału po napełnieniu silosu. Urządzenie to pozwala na pomiar w trzech wymiarach.



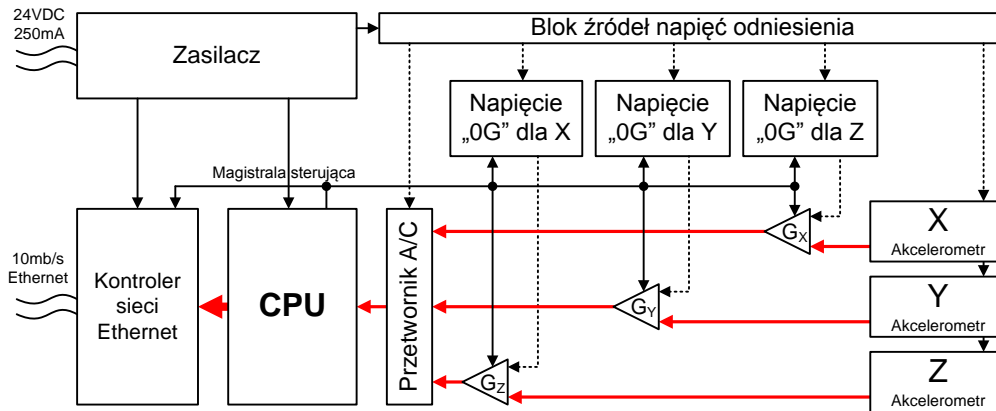
Rysunek 6. Zdjęcie zamocowanej belki tensometrycznej

W zależności od przyłożonej siły, belka tensometryczna zasilana napięciem +/- 15V generuje sygnał pomiarowy proporcjonalny do ciężaru silosu. W celu wzmocnienia sygnału pomiarowego opracowany został wzmacniacz, którego schemat widoczny jest na rysunku. Zaprojektowany układ pomiarowy PCB opiera się na wykorzystaniu wzmacniacza typu INA125. Umożliwia on swobodny dobór wzmocnienia sygnału poprzez znajdujący się na płycie potencjometr. Rysunek 7 pokazuje podłączenie przewodów sygnałowych wychodzących z poszczególnych wzmacniaczy do karty pomiarowej *National Instrument NI-USB-6259*. Karta podłączona jest poprzez interfejs USB do komputera, który dzięki opracowanej w tym celu aplikacji kontroluje akwizycję sygnałów pomiarowych.

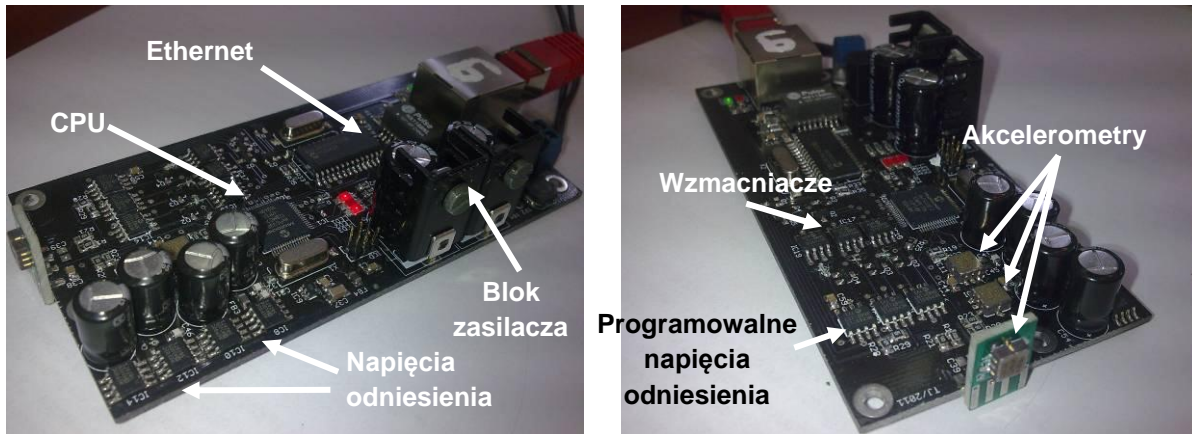


Rysunek 7. System wag, a) schemat ideowy wzmacniacza sygnału pomiarowego z belek tensometrycznych, b) fotografia pokazująca podłączenie układów akwizycji danych z belek tensometrycznych.

W przypadku układów akcelerometrycznych wykonano zestaw 8 płytek PCB z trójosiowymi akcelerometrami. Ich zadaniem jest dostarczenie informacji o poziomie drgań konstrukcji silosu w trakcie rozładunku silosu smukłego, gdzie interakcja materiału ze ścianą silosu powoduje zdecydowanie większy efekt niż w przypadku przepływu kominowego w silosie krępy. W zależności od tego, w jaki sposób zostaną rozłożone punkty pomiarowe informacja może dotyczyć albo przekroju silosu na zadanej (montażowej) wysokości lub wzdłuż całej długości silosu. Układ do pomiaru przyspieszeń wyposażony jest w trójosiowy akcelerometr z rodziny czujników MEMS. Jest to czujnik analogowy o nazwie własnej ADXL001-70. Zakres jego pracy wynosi +/- 70 g z wysoką liniowością (0.2%) w całym zakresie pomiarowym. Sygnał analogowy otrzymany z akcelerometrów jest wstępnie przetwarzany przez programowalny układ wzmacniający pozwalający na ustawienie zarówno napięcia referencyjnego (dla 0 g) dla każdej osi pomiarowej, jak i wzmocnień sygnału. Na kolejnych rysunkach pokazano główne elementy toru pomiarowego (rys. 8) oraz zdjęcie pojedynczego układu (rys. 9).



Rysunek 8. Architektura akcelerometru ADXL001-70.



Rysunek 9. Płytki PCB z zamontowanym trójosiowym układem akcelerometrów

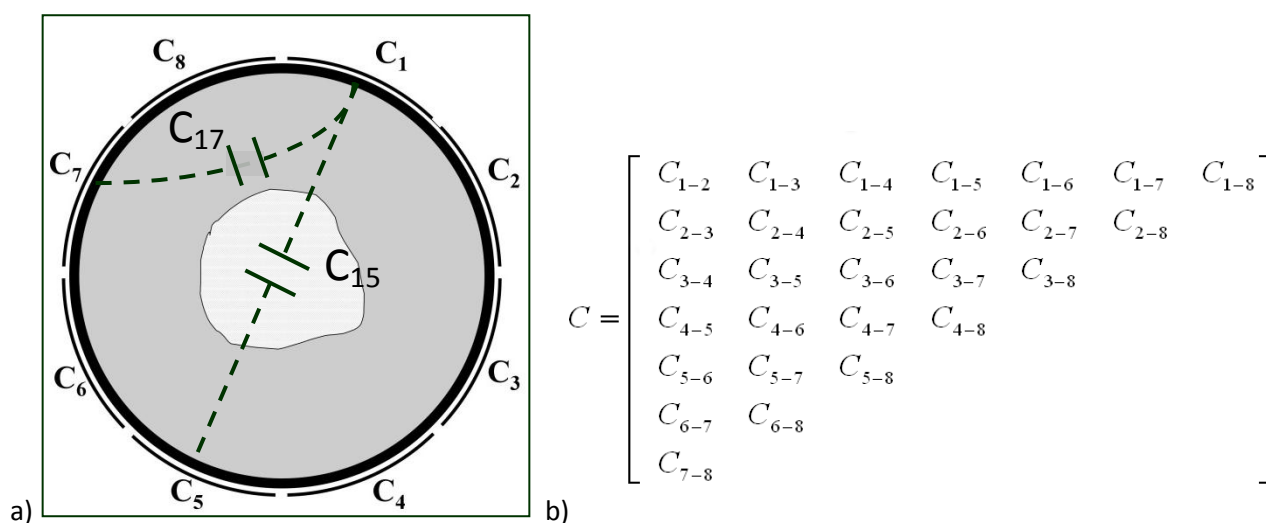
Sygnaly analogowe kontrolowane są, w układach akcelerometrycznych, za pośrednictwem magistrali SPI przez 16-bitowy mikrokontroler Microchip z wbudowanym 12-bitowym przetwornikiem ADC, zdolnym do pracy przy 0,5 Msps (próbki na sekundę). Ostatnim etapem zbierania danych jest blok komunikacji sprzętowej zaprojektowany do popularnego standardu Ethernet. Jego prędkość docelowa to 10 Mb/s, co pozwala uzyskać pomiary przyspieszenia z prędkością 70 kps w trzech osiach XYZ. Realizowany stos komunikacji sieciowej współpracuje z protokołami sieciowymi UDP oraz IP, ICMP i ARP. Takie rozwiązanie jest dość istotne ze względu na łatwość obsługi akwizycji danych w komputerze PC. Oprogramowanie wbudowane w akcelerometr wykorzystuje zarówno konwerter ADC oraz kontroler pamięci DMA, zaprogramowany w trybie tzw. *ping-pong*. Tryb ten umożliwia użycie naprzemienne dwóch buforów danych. Podczas gdy jeden bufor umieszczony jest w ramce UDP/IP/Ethernet i wysyłany do najbliższego routera czy komputera, drugi z buforów może być używany do przechowywania danych z konwertera ADC. Jednostka CPU kontroluje przepływ danych między kontrolerem sieciowym Ethernet, podczas gdy pomiary dokonywane są w tle. Wysłanie danych do kontrolera przy wykorzystaniu interfejsu Ethernet 10mb/s (protokół UDP) pozwala na akwizycję danych z całego zestawu 8 akcelerometrów. Takie rozwiązanie pozwala w sposób elastyczny kontrolować akwizycję danych oraz synchronizować pracę poszczególnych układów akcelerometrów. System akcelerometrów jest zaprojektowany do pracy przemysłowej. Według specyfikacji może pracować w temperaturze od -40 do 125 stopni Celsjusza, co odróżnia go od innych urządzeń tego typu. Urządzenie pomiarowe zasilane jest napięciem 24 V i pobiera 0,8 A.

Wykonane w ramach ww. zadania projekty poszczególnych elementów stanowiska laboratoryjnego, umożliwiły realizację prac budowlanych oraz montażowych (zbiorników buforowych, zbiorników

odbiorczych, konstrukcji stalowych wspierających silosy będących częścią stanowisk pomiarowych oraz belek tensometrycznych) w Laboratorium Tomografii Procesowej. Wykonano również system podciśnieniowego przepływu pneumatycznego materiałów sypkich, w celu przesypywania materiału pomiędzy zbiornikami buforowymi, znajdującymi się pod silosami oraz między samymi silosami. Bardzo istotną rolę w budowie systemu silosów stanowi odpowiednio zaprojektowany i zbudowany system połączeń elektrycznych, zarówno sygnałów sterujących, jak również zasilania. Istniejąca w Laboratorium Tomografii Procesowej instalacja wymagała rozbudowy o dodatkowe układy bezpieczeństwa (m.in. uwzględnienia dodatkowego uziemienia). W ramach niniejszego zadania zakupiono i zamontowano również szafę sterowniczą typu RACK, do której doprowadzone zostały sygnały pomiarowe oraz sterujące systemem. Przygotowane w ten sposób stanowisko do przepływów grawitacyjnych stanowiło podstawę do dalszych prac nad czujnikami ECT oraz pomiarem zmian pojemności przy pomocy tomografu ECT.

## 2. Opracowanie aplikacji do projektowania czujników ECT w oparciu o analizę pola elektrycznego

Główną metodą pomiarową, nad którą prowadzone były badania zdolności pomiaru obiektów o dużym rozmiarze, jest elektryczna tomografia pojemnościowa ECT. Komputerowy system pomiarowy ECT składa się z układu pomiarowego, czujnika pomiarowego oraz komputera, który umożliwia programowanie tomografu, sterowanie wykonaniem pomiaru, rejestrację i archiwizację danych oraz przeprowadzanie procesu rekonstrukcji. Zasada pomiaru z wykorzystaniem elektrycznej tomografii pojemnościowej opiera się na dielektrycznych właściwości materiału znajdującego się w przestrzeni pomiarowej czujnika. Czujnik ECT składa się z zestawu elektrod rozmieszczonych zazwyczaj na zewnątrz badanego obiektu (Rys. 11a). Poszczególne pary elektrod pomiarowych tworzą okładki kondensatorów, pomiędzy którymi mierzona jest pojemność elektryczna. Dla każdej pary elektrod – nadawczej i odbiorczej – rejestrowana jest wartość pojemności międzyelektrodowej  $c_i$ , gdzie  $i = 0..N-1$  -  $N$  jest liczbą niezależnych pomiarów obliczanych wg wzoru  $N = (ne \cdot (ne - 1)) / 2$ , dla liczba elektrod  $ne$ . Zebrane w każdej dyskretnej chwili czasowej pomiary, stanowią  $N$ -wymiarowy wektor danych. Przez dyskretną chwilę czasową rozumie się czas niezbędny na zebranie  $N$  pomiarów. Na rysunku 11b przedstawiono niezależne kombinacje par elektrod pomiarowych w postaci trójkąta pomiarów bez powtórzeń, tworzące wektor pomiarowy dla tomografu wyposażonego w czujnik 8 elektrodowy.



Rysunek 11. Uproszczony schemat pomiaru w ECT, a) przekrój 8-elektrodowego czujnika ECT, b) zbiór wartości pomiarowych

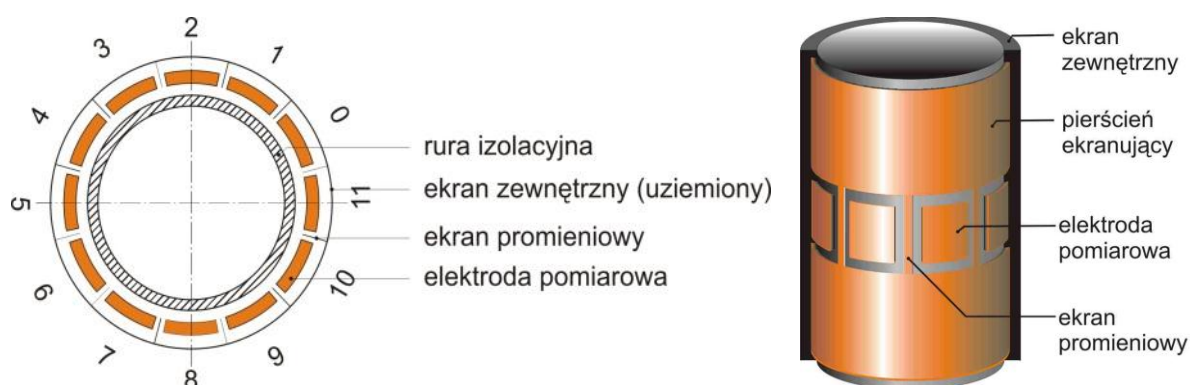


W celu wydobycia informacji, dotyczącej badanego procesu, jest dokonywane przetwarzanie i analiza danych pomiarowych. Dwa główne nurty stosowane przy przetwarzaniu danych opierają się na:

- przetwarzaniu danych pomiarowych, tzw. surowych (z ang. raw data), nie poddanych procesowi rekonstrukcji obrazu;
- rekonstrukcji obrazów w oparciu o wektor pomiarowy, oraz ich dalszemu przetworzeniu i analizie.

Możliwe jest też przetwarzanie i analiza sekwencji zrekonstruowanych obrazów w celu otrzymania ilościowego, parametrycznego opisu zmian w czasie badanych zjawisk.

Istotnym elementem systemu pomiarowego jest czujnik ECT. Schemat pokazany na rysunku 11a jest schematem poglądowym. Przygotowanie czujnika do pomiaru niewielkich zmian koncentracji materiału sypkiego, pracującego w warunkach przemysłowych, wymaga zastosowania dodatkowych ekranów eliminujących zakłócenia oraz poprawiających jakość sygnału pomiarowego. Czujnik ECT jest strukturą mechaniczno-elektryczną, zbudowaną najczęściej w oparciu o walcowy profil zamknięty. Kluczowymi elementami czujnika pojemnościowego, mającymi wpływ na generowane w nim pole elektryczne są: układ elektrod pomiarowych oraz system ekranów. Najczęściej stosuje się ekranowanie zewnętrzne, w postaci płaszcza miedzianego, uziemionego i odizolowanego od systemu elektrod, obejmującego swoim obszarem całą strefę pomiarową czujnika. Na rysunku 12 pokazano schemat tomograficznego czujnika pomiarowego (2D ECT) do obrazowania przestrzeni pomiarowej w formie obrazu dwuwymiarowego. Pokazane na nim zostały poszczególne elementy czujnika: elektrody pomiarowe, ekran zewnętrzny, pierścień ekranujący oraz ekran promieniowy.



Rysunek 12. Schemat tomograficznego czujnika pomiarowego ECT.

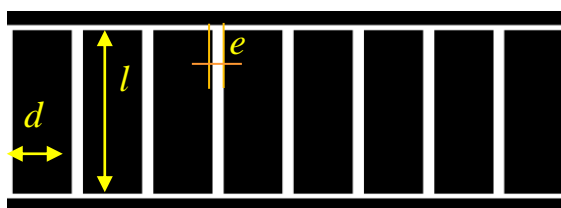
Zastosowanie ekranu zewnętrznego umożliwia skuteczne odseparowanie układu pomiarowego czujnika od zakłóceń zewnętrznych oraz ograniczenie obszaru występowania pola elektrycznego i zdolności detekcyjnych czujnika do obszaru profilu zamkniętego oraz jego bliskiego sąsiedztwa. W celu wzmocnienia pola elektrycznego wewnątrz obszaru pomiarowego stosowane są dodatkowe ekrany promieniowe, które zmniejszają znacząco ilość linii sił pola między elektrodami sąsiednimi w obszarze ściany zbiornika. Rolą pierścieni ekranujących, dolnego oraz górnego, jest ograniczenie pola elektrycznego poza przestrzenią wyznaczoną przez elektrody pomiarowe.

Stosowane do tej pory czujniki pomiarowe do przepływów materiałów sypkich miały rozmiar od kilku do kilkunastu cm, zarówno budowane dla okrągłego jak i prostokątnego przekroju zbiornika. W dotychczas prowadzonych przez autorów projektu pracach posługiwano się czujnikami o średnicach wewnętrznych do 20cm. Chcąc zbadać możliwość zastosowania technik tomograficznych w dużej skali, rozszerzając przez to możliwości zastosowania technik tomograficznych w przemyśle w szerszym wymiarze niż dotychczas,

konieczne stało się zweryfikowanie zdolności pomiarowych dla zbiorników o średnicach sięgających lub przewyższających 1 m. Wykonanie takich czujników, w ramach projektu, poprzedzone zostało licznymi symulacjami komputerowymi, pozwalającymi określić zakres pomiarowy projektowanych czujników. Opracowany, na potrzeby modelowania czujników 2D ECT, moduł programistyczny rozszerza rozwijane w Katedrze oprogramowanie dla potrzeb rekonstrukcji i analizy obrazów 3D - TomoKISStudio (Banasiak i inni, 2010). Moduł ten przeprowadza obliczenia numeryczne rozkładu pola elektrycznego wewnątrz czujnika ECT 2D w jego przestrzeni trójwymiarowej. Warto nadmienić, że mimo zastosowania w pracach badawczych dwuwymiarowych technik tomograficznych, w celu zwiększenia dokładności modelu komputerowego, zaimplementowano trójwymiarowe techniki symulacji. Architektura rozbudowywanej aplikacji zawiera szereg modułów, które sprawiają, że oprogramowanie przyjęło rozmiary pozwalające na kompleksową analizę i obróbkę danych tomograficznych. Oprócz możliwości komunikacji z urządzeniami tomografu, symulacji pola elektrycznego w przestrzeni czujnika ECT i mechanizmów umożliwiających analizę wrażliwości czujników, do oprogramowania zostały dodane dwa moduły (wtyczki) rozszerzające możliwości oprogramowania o elementy konstrukcji siatek dwu- i trójwymiarowych oraz modelowania i projektowania rozkładu elektrod czujników 2D i 3D ECT. W dalszej części opisane zostaną te funkcje oprogramowania, które zostały opracowane w ramach realizacji projektu i pozwalają między innymi na:

### 1. Przygotowanie komputerowego modelu czujnika ECT

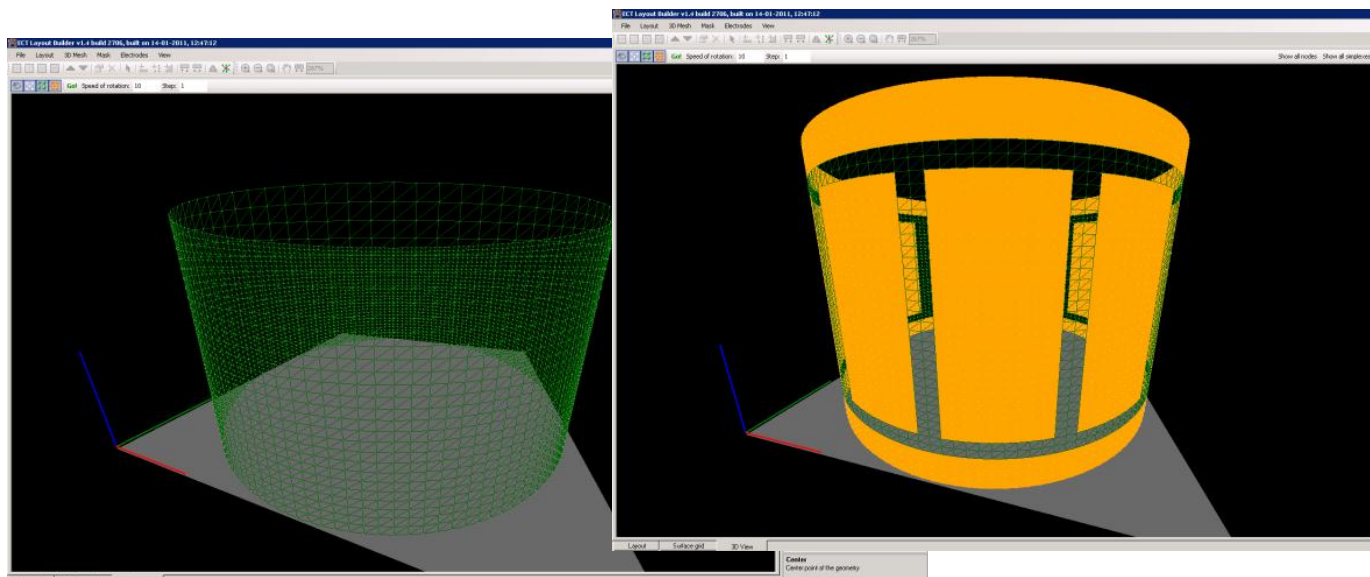
W oparciu o przygotowane oprogramowanie możliwe jest rozmieszczenie w dowolny sposób elektrod pomiarowych na granicy zdefiniowanego walca, stanowiącego przestrzeń pomiarową. Liczba i rozmiar elektrod podawana jest przez użytkownika. Po zdefiniowaniu liczby elektrod definiowane są parametry elektrody:  $d$  – szerokość,  $l$  – długość,  $e$  – przerwa międzyelektrodowa (rys. 13).



Rysunek 13. Schemat czujnika ECT z zaznaczeniem jego parametrów.

Elektrody rzutowane są na siatkę dyskretnych elementów - wokseli, na które została podzielona przestrzeń czujnika. Zadaniem funkcji jest przyporządkowanie wierzchołków wokseli do obszarów poszczególnych elektrod. Po etapie automatycznego przyporządkowania wierzchołków do elektrod użytkownik może ręcznie zmodyfikować przynależność wierzchołków, poprawiając w ten sposób symetrię rozkładu wokseli leżących w obszarze elektrod. Projektowanie dowolnej przestrzennej geometrii czujnika oraz lokalizacji elektrod pomiarowych w dowolnym jego obszarze powoduje, że moduł ten jest szczególnie przydatny przy projektowaniu czujników, których czułość pomiarowa, często nazywana też wrażliwością pomiarową, będzie ukierunkowana na wykrywanie niewielkiej zmiany koncentracji materiału w konkretnym obszarze silosu.

Przygotowanie geometrii elektrod bazuje na zdefiniowanej wcześniej siatce elementów dyskretnych (rysunek 14a). W trakcie generowania siatki wokseli użytkownik określa grubość ściany zbiornika oraz poziom zagęszczenia elementów dyskretnych na granicach obszarów elektrod, ściany zbiornika oraz wewnętrznej przestrzeni zbiornika. Istotne jest to ze względu na duży gradient zmian potencjału elektrycznego w tych newralgicznych obszarach. Informacja o węzłach siatki należących do obszaru elektrod stanowi element wejściowy do analizy pola elektrycznego wewnątrz zdefiniowanego obszaru czujnika ECT.



Rysunek 14. Widok okna głównego aplikacji z przykładową geometrią obszaru pomiarowego, a) siatka elementów dyskretnych, b) rozkład elektrod oraz pierścienia ekranującego.

## 2. Wyznaczanie rozkładu pola elektrycznego wewnątrz czujnika;

W oparciu o zaimplementowaną metodę elementów skończonych (ang. Finite Elements Methods) wyznaczany zostaje rozkład pola elektrycznego dla zdefiniowanego wcześniej (punkt 1) czujnika pomiarowego ECT. Obliczenia, przy założeniu braku ładunków przestrzennych, rozkładu pola elektrycznego w czujniku pomiarowym polegają na numerycznym rozwiązaniu równania Laplace'a:

$$\nabla \cdot [\varepsilon(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z)] = 0 \quad (2)$$

gdzie  $\varepsilon(x, y, z)$  jest przestrzennym rozkładem przenikalności dielektrycznej,  $\varphi(x, y, z)$  jest przestrzennym rozkładem potencjałów elektrycznych w wokselał siatki,  $\nabla$  jest operatorem gradientu, a  $\nabla \cdot$  jest operatorem dywergencji.

## 3. Wyznaczanie i przestrzenna wizualizacja czułości pomiarowej czujnika ECT.

Kolejną funkcją aplikacji w tym zadaniu projektu jest moduł wyznaczania macierzy czułości. Macierz czułości w  $k$ -tym wokselał obszaru czujnika określa poziom zmiany pojemności między parami elektrod spowodowanej zmianą przenikalności elektrycznej w tym wokselał. Zmiany pojemności  $\Delta C$  w odpowiedzi na zmiany zachodzące w rozkładzie przenikalności elektrycznej  $\Delta \varepsilon$  wewnątrz czujnika mogą zostać zapisane jako rozwinięcie szeregu Taylora (Wajman, 2006; Iskasen, 1996):

$$\Delta C = \frac{df}{d\varepsilon} (\Delta \varepsilon) + O((\Delta \varepsilon)^2)$$

gdzie współczynnik  $df/d\varepsilon$  jest określony jako czułość pojemności na zmiany w rozkładzie przenikalności dielektrycznej, czynnik  $O((\Delta \varepsilon)^2)$  określa człon wyższego rzędu. Uproszczenie równania do formy liniowej poprzez zaniedbanie członów wyższego rzędu można zapisać (Yang i inni, 1999):

$$\Delta C = S * \Delta \varepsilon$$

Zapis powyższej zależności stosowany szeroko w zagadnieniu prostym w tomografii pojemnościowej, dla  $M$  elementów siatki i  $N$  liczby pomiarów, ma postać:

$$\Delta C_{N \times 1} = S_{N \times M} * \Delta \varepsilon_{M \times 1}$$

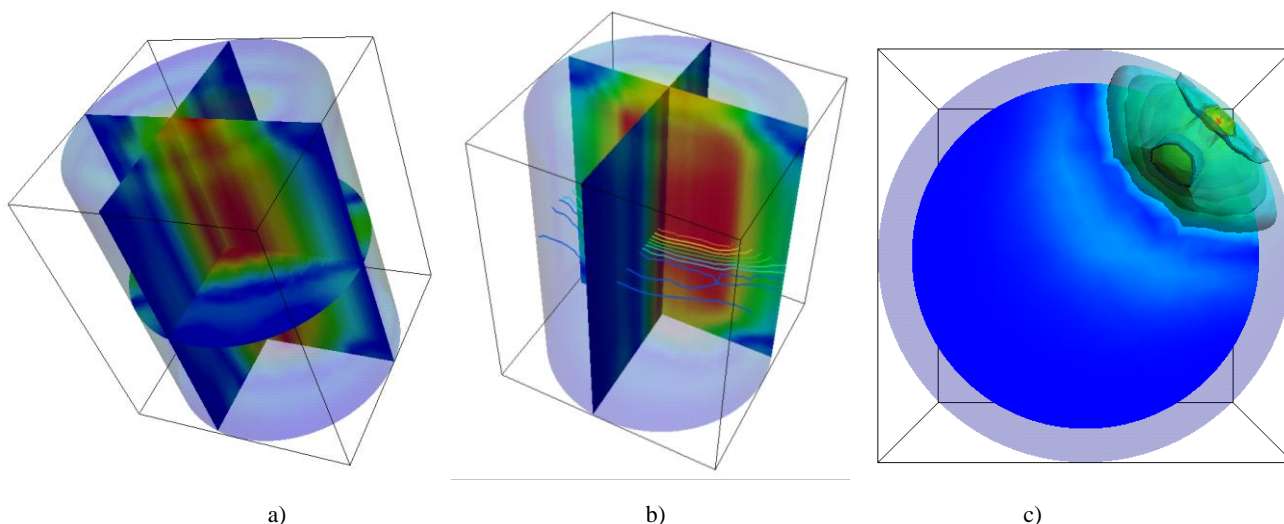
Macierz czułości  $S$  zawiera opis zmian pomierzonych pojemności spowodowanych zmianami stałej dielektrycznej w każdym elemencie (wokselu) wewnątrz obszaru czujnika. Wiersze macierzy czułości nazywane są mapami czułości (dla jednej pary elektrod) i określają wpływ zmian wartości wokseli na poszczególne wartości pojemności pomiędzy kolejnymi parami elektrod. Zmiany pojemności odzwierciedlają zmiany koncentracji materiału sypkiego w trakcie procesu opróżniania zbiornika, a ich analiza dostarcza informacji o stanie procesu. Konieczna wydaje się praca nad geometrią elektrod, która pozwoli otrzymać relatywnie wysoką czułość pomiaru.

Najczęściej używana metoda wyznaczania rozkładu czułości pomiarowej systemu ECT jest oparta na analizie rozkładu pola elektrycznego wewnątrz czujnika ECT [1, 3, 9, 16, 17, 18 – ref słok 2011]. Mapy czułości dla poszczególnych par elektrod EG (*ang. Excited - Grounded*) oraz  $k$ -elementu siatki wyznaczyć można za pomocą równania (1):

$$S_{EG}^{(p)} = - \int_{\Omega_k} \mathbf{E}_E^{(p)} \cdot \mathbf{E}_G^{(p)} d\Omega \quad (1)$$

gdzie  $\mathbf{E}_E^{(k)}$  jest wektorem pola elektrycznego wewnątrz elementu  $p$ , kiedy elektrodą aktywną jest elektroda  $E$ ,  $\mathbf{E}_G^{(k)}$  jest wektorem pola elektrycznego wewnątrz elementu  $p$ , kiedy elektrodą aktywną jest elektroda  $G$ .  $\Omega_k$  jest objętością  $p$ -tego elementu siatki.

Rozważania dotyczące symulacji i wyznaczania macierzy czułości opierają się na dwóch założeniach. Częstotliwość źródeł prądów zmiennych w systemach tomograficznych jest relatywnie niska, dlatego też zagadnienia związane z wyznaczaniem czułości pomiarowej mogą pomijać obecność pola magnetycznego. Dodatkowo zakładany jest brak ładunków przestrzennych. Na rysunku 15 pokazano przykładowe znormalizowane przestrzenne mapy czułości pomiędzy wybranymi parami elektrod modelowanego czujnika 2D ECT.



Rysunek 15. Przykładowe znormalizowane mapy czułości dla czujników 2D ECT, a) wizualizacja 3D mapy czułości między naprzeciwległymi elektrodami dla czujnika 12-elektrodowego b) wizualizacja 3D mapy czułości między naprzeciwległymi elektrodami z naniesionymi liniami pola elektrycznego dla czujnika 8-elektrodowego, c) rozkład wartości mapy czułości dla elektrod przyległych.

### 3. Przygotowanie zestawu czujników pomiarowych

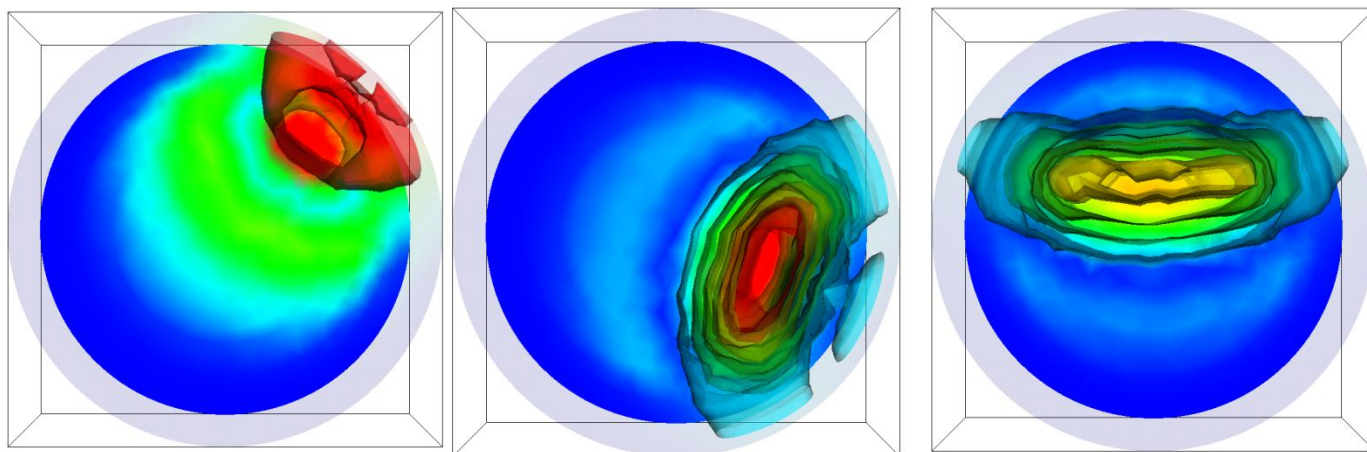
Głównym parametrem czujnika pomiarowego jest liczba elektrod. Dla systemu tomografii pojemnościowej waha się na ogół od kilku do kilkunastu w przypadku czujnika 2D oraz do kilkudziesięciu w przypadku czujnika 3D. Większa liczba elektrod, oznaczająca większą liczbę niezależnych pomiarów, jest teoretycznie bardziej korzystna ze względu na jakość rekonstruowanego obrazu. W praktyce liczba elektrod musi być jednak ograniczona ze względu na określoną czułość urządzeń pomiarowych, która wymaga, aby mierzone wielkości i zmiany pojemności miały określoną wartość – większą od możliwej do zmierzenia wartości minimalnej, co z kolei wymusza stosowanie elektrod z odpowiednio dużym polem powierzchni aktywnej. Dodatkowo pojemności między elektrodami są redukowane poprzez stosowanie elektrod ekranujących układ przed czynnikami zewnętrznymi i kształtujących pole elektryczne w pożądany sposób. Na skutek tych ograniczeń wartości pojemności między elektrodami są bardzo małe, na ogół znacznie mniejsze od 1.0 pF i dodatkowo mierzone wraz z istniejącymi pojemnościami pasożytniczymi. Są one wnoszone przykładowo przez okablowanie i sprawiają, że bezpośredni pomiar pojemności międzyelektrodowych jest bardzo trudny, obciążony dużym błędem i niepraktyczny. Zamiast tego rozwiązania, powszechnie stosowaną metodą jest pomiar zmian pojemności, w którym bezwzględna wartość zmierzona pojemności jest obciążona dużym błędem, ale różnice pojemności mierzone są już z większą dokładnością. W trakcie prac projektowych brano pod uwagę, z powyższych względów, czujniki ECT składające się z 6, 8 oraz 12 elektrod.

Wstępnym etapem prac przy projektowaniu czujników było określenie rozmiarów elektrod pomiarowych najbardziej odpowiednich do pomiaru niewielkich zmian koncentracji materiału sypkiego. W tym celu przeprowadzono symulacje komputerowe rozkładu pola elektrycznego w przestrzeni pomiarowej czujników o różnej geometrii. Do obliczeń numerycznych użyto opracowanego programu zaprezentowanego w ramach opisu zadania 2. Przeprowadzono również analizę map czułości dla modelowanych czujników, której rezultaty stanowiły kluczowy element przy budowie rzeczywistego czujnika ECT. Ze względu na konieczność zastosowania czujników posiadających zwiększoną wrażliwość przy tak dużych średnicach zdecydowano się na zaprojektowanie czujników z elektrodami wewnętrznymi. Średnica projektowanych czujników wynosiła 0.65 [m]. Pierwszym analizowanym czujnikiem był czujnik budowany dla silosu smukłego – S2. Wyniki otrzymane dla mniejszego z silosów pozwoliły, w późniejszej pracy, również zaprojektować czujnik dla silosu krępego S1. Badania dotyczyły czujników 2D ECT zarówno 8- oraz jak i 12-elektrodowych. Wymiary geometryczne przygotowanych modeli czujników pojemnościowych zostały przedstawione w tabeli 1. Wysokość ekranu ochronnego górnego oraz dolnego, wchodzącego w skład pierścieni ekranujących (rys), wynosiła 0.03 m.

**Tabela 1**  
Rozmiary geometryczne czujników ECT

Numer czujnika	Liczba elektrod	Długość elektrod - $l$ [m]	Szerokość elektrod - $d$ [m]	Przerwa międzyelektrodami - $e$ [m]
1	8	0.65	0.215	0.02
2	8	0.3	0.235	0.01
3	8	0.2	0.245	0.005
4	12	0.65	0.13	0.02
5	12	0.3	0.15	0.01
6	12	0.2	0.16	0.005

Wizualizacje przykładowych map czułości zostały w formie obrazu 3D pokazane na rysunku 16.



Rysunek 16. Trójwymiarowa wizualizacja obszaru czułości dla różnych par elektrod czujnika 2D ECT, 8-elektrodowego – widok z góry czujnika.

Porównanie poszczególnych map czułości na podstawie wizualnej oceny jakości jest nie wystarczające i wymaga dokładniejszej oceny jakości czujnika. W celu ilościowego porównania otrzymanych wyników zaproponowano zastosowanie parametrycznego opisu map czułości. W przypadku czujnika 2D ECT zakres czułości pomiarowej zawiera się w przedziale, którego granice definiują wartości map czułości dla przyległych elektrod (górną granicę przedziału) oraz leżących naprzeciw siebie (dolną granicę przedziału). W przypadku tych pierwszych jest to najbliższa odległość między elektrodami czujnika, w przypadku tych drugich najdalsza. Dlatego też analizę porównawczą przeprowadzono na podstawie dwóch par elektrod, dla najbliższych i najdalej położonych elektrod od siebie. W tabeli 2 przedstawiono wartości parametrów map czułości dla czujników z tabeli 1. Poszczególne wartości parametrów map czułości to wartość minimalna  $S_{min}$ , maksymalna  $S_{max}$  oraz współczynnik kształtu mapy czułości  $S_k$ , obliczany według wzoru:

$$S_k^{i,j} = \frac{S_{max}^{i,j} - S_{min}^{i,j}}{\sum_{p=1}^{p=M} S_p^{i,j}}$$

gdzie  $p$  oznacza element siatki,  $M$  liczbę elementów siatki,  $S_p^{i,j}$  wyznaczoną czułość dla elementu  $p$  przy analizie mapy czułości między elektrodami  $i$  oraz  $j$ .

Otrzymane wyniki (Tabela 2) zostały porównane do parametrów macierzy czułości uzyskanych podczas numerycznych obliczeń dla rzeczywistego czujnika 12-elektrodowego ECT. Czujnik ten stosowany przez autorów projektu we wcześniejszych badaniach pozwolił na wykrycie niewielkich zmian koncentracji materiału sypkiego [ref], w stopniu wystarczającym do monitorowania stanu procesu rozładunku silosu. Wartości parametru  $S_k$  dla tego czujnika zawierały się w przedziale pomiędzy 314 (dla elektrod przyległych) oraz 53 (dla elektrod naprzeciwległych). Wartości (zgromadzone w Tabeli 2) pokazują, że w przypadku modelowanych czujników największej czułości pomiarowej można się spodziewać dla elektrod przyległych, zarówno dla 8- (czujnik nr 3) jak i 12-elektrodowego (czujnik nr 6), mimo nie najdłuższych elektrod w analizowanej grupie czujników. Analiza wartości minimalnych, występujących dla naprzeciwległych elektrod ( $S_{min}$ ), pokazuje, że najwyższe wartości występują w przypadku najdłuższych elektrod (czujnik 1 oraz czujnik 4, odpowiednio dla 8- i 12-elektrodowego czujnika). W tym jednak przypadku różnice między poszczególnymi projektowanymi czujnikami nie są tak znaczące jak to miało miejsce dla wartości  $S_{max}$ . W przypadku parametrów  $S_k$  dla czujników 8-elektrodowych, zarówno w przypadku par elektrod przyległych

jak i przeciwległych, największe wartości występują dla czujnika o największym rozmiarze (czujnik nr 1). Natomiast dla czujnika 12-elektrodowego wartość największa, w przypadku przyległych elektrod, występuje dla czujnika nr 3, a dla naprzeciwległych dla czujnika nr. 6. Można wnioskować, że zmniejszenie/zwiększenie długości elektrody można w pewnym stopniu rekompensować zmniejszeniem/zwiększeniem odległości między elektrodami.

**Tabela 2**

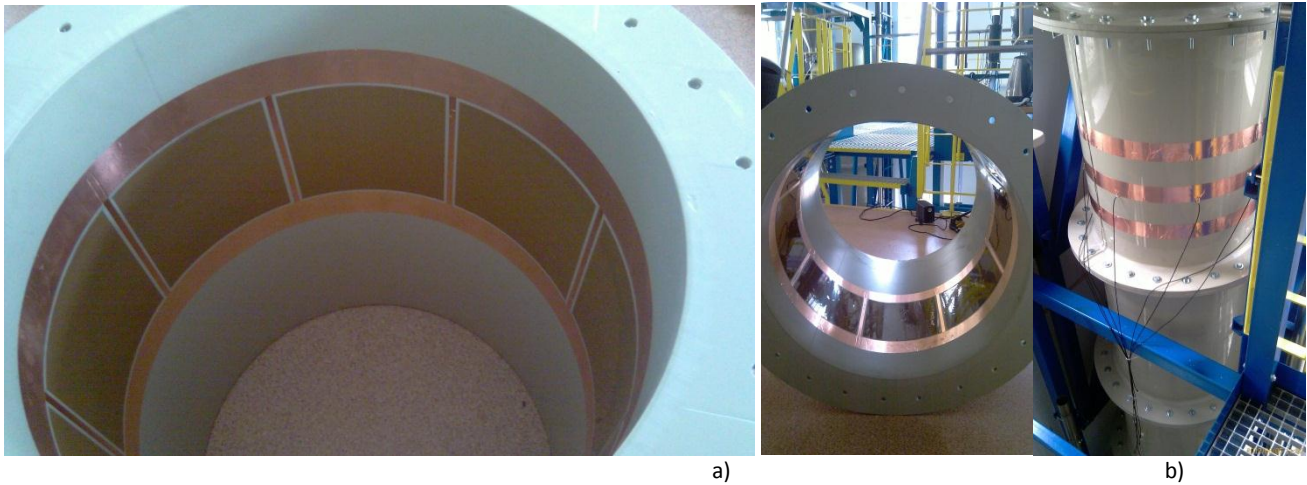
Parametry macierzy czułości dla poszczególnych czujników pomiarowych

( $S_{max}$  – wyznaczono dla elektrody przyległych  $C_{1,2}$ ,

$S_{min}$  dla elektrod naprzeciwległych:  $C_{1,5}$  – czujnik 8-elektrodowy,  $C_{1,7}$  – czujnik 12-elektrodowy)

$\rho$	$l$	$S_{min}$ [*10 <sup>-6</sup> ]	$S_{max}$ [*10 <sup>-3</sup> ]	$S_k$	
				$C_{1,2}$	$C_{1,5}/C_{1,7}$
1		7,78	3,00	87,73	59,51
2		7,09	2,30	50,07	37,9
3		6,61	3,60	59,1	45,56
4		3,65	3,50	102,58	67,41
5		3,12	3,00	65,61	43,27
6		2,77	5,30	96,01	69,25

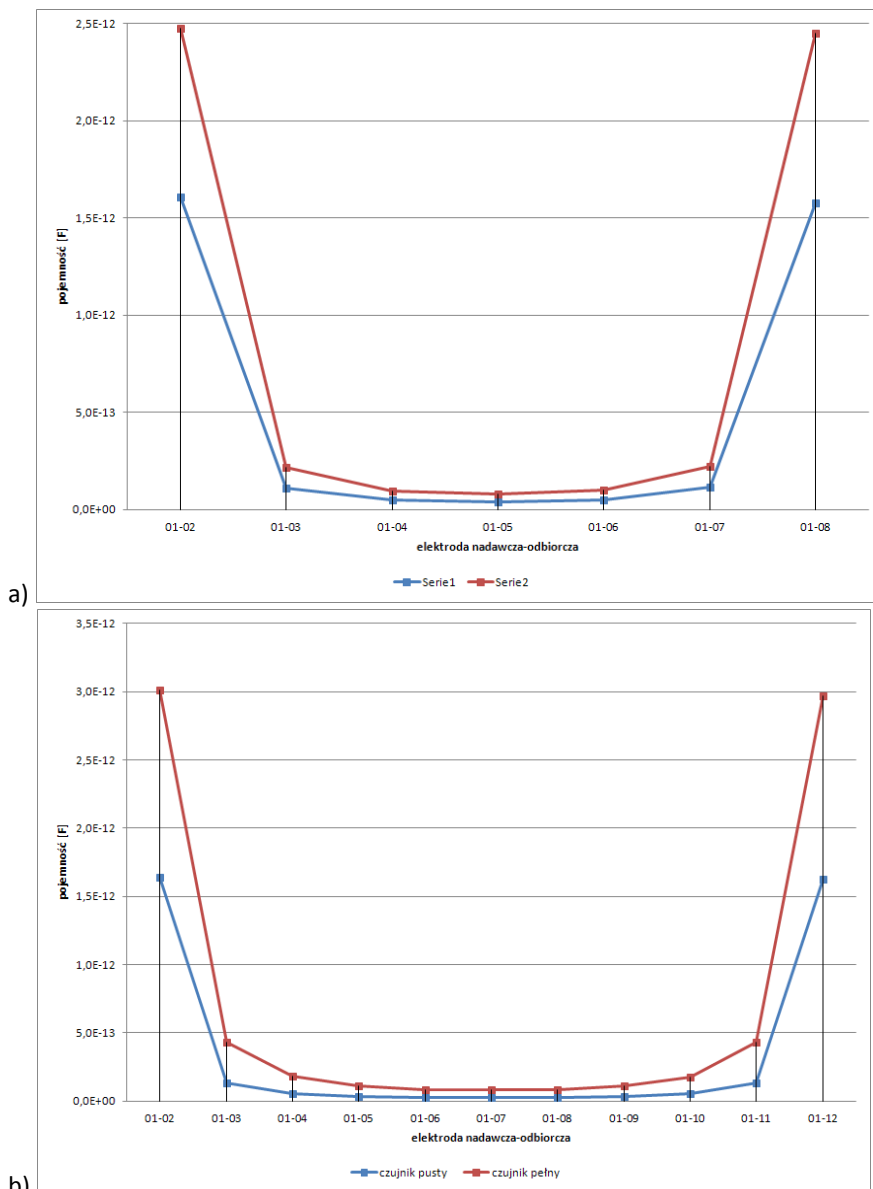
Należy również zwrócić uwagę, że wadą czujników 12-elektrodowych, mimo lepszych parametrów map czułości (Tabela 2), jest uśrednianie sygnału z całej jej długości. Jest to niepożądany efekt w celach analizy dynamicznych przepływów materiałów sypkich. Powyższe wnioski skłoniły autorów projektu do zastosowania czujników 2D ECT 8-elektrodowych jako czujników docelowych do wizualizacji przepływu. Dodatkową przyczyną wyboru czujnika 8-elektrodowego było również to, że mniejsza liczba elektrod zwiększa szybkość akwizycji danych pomiarowych. Dla czujnika 8-elektrodowego jest to 28 pomiarów przypadających na jedną ramkę pomiarową, w przypadku 12-elektrodowego liczba ta wzrasta do 66 pomiarów na ramkę pomiarową. W ten sposób tracąc na jakości zrekonstruowanego obrazu można zyskać szybszą akwizycję danych pomiarowych, co jest znaczące przy monitorowaniu dynamicznych procesów przemysłowych. Należy też mieć na względzie, że jednostka pomiarowa jaką jest tomograf ECT, ma ograniczony zakres pomiaru. Zwiększenie rozmiaru elektrody może skutkować brakiem możliwości pomiaru przy pełnym wypełnieniu czujnika, szczególnie dla pomiaru między przyległymi elektrodami. Zbudowany czujnik składał się z 8 elektrod o rozmiarze 24.7x24.7 cm. Przerwa międzyelektrodowa  $e$  wynosiła 2cm. Pierścienie ekranujące miały szerokość 5 cm. W celu wzmocnienia pola elektrycznego wewnątrz obszaru pomiarowego zastosowano dodatkowo ekrany promieniowe. Szerokość ekranów promieniujących, ulokowanych między elektrodami, wynosiła 1 cm. Na rysunku 17 pokazane zostały zdjęcia przygotowanych czujników.



Rysunek 17. Zdjęcie czujników 2D ECT 8-elektrodowego, a) czujnik na etapie budowy, b) czujnik zamontowany w konstrukcji silosu.

Dla przygotowanych czujników 8 –elektrodowych ECT, przed przystąpieniem do właściwych pomiarów przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich, wykonano pomiary statyczne dla pełnego oraz pustego czujnika. Pomiary te zostały wykonane przy pomocy miernika LRC Agilent E4980A. W pierwszym etapie oceny zdolności metrologicznych czujnika pomiarowego przeprowadzono pomiar pojemności międzyelektrodowych dla czujnika wypełnionego granulatem HDPE. Na rysunku 18 pokazano rozkład danych pomiarowych dla poszczególnych par elektrod. Dla porównania pokazano wyniki czujnika 12-elektrodowego używanego we wcześniejszych badaniach. Zakres zmian wartości pomiarowych przedstawia typowy kształt rozkładu wartości pomiarowych dla czujników ECT, co potwierdza poprawność wykonania czujnika.

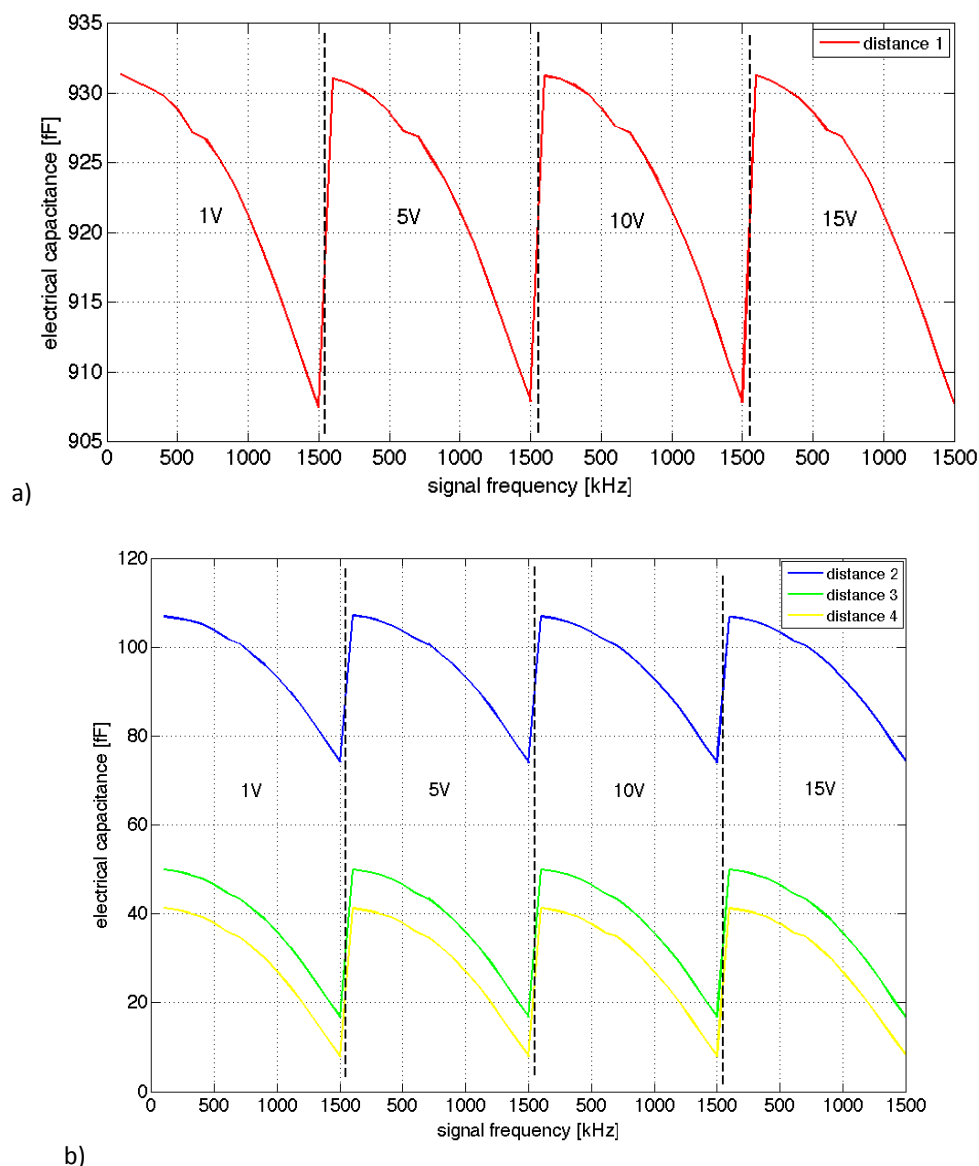




Rysunek 18. Rozkład wartości pomiarowych według numeru elektrody odbiorczej dla pełnego (kol. czerwony) oraz pustego (niebieski) czujnika ECT, a) czujnik dużej skali 8-elektrodowy, b) czujnik zewnętrzny 12-elektrodowy o średnicy 200mm, c) zdjęcie pracującego układu pomiarowego LRC Agilent E4980A,

W kolejnym etapie prac zbadano również wpływ częstotliwości oraz amplitudy sygnału wymuszającego na zakres pomiarowy między poszczególnymi parami elektrod. Pomiaru te miały na celu wyznaczenie najlepszych parametrów sygnałów wymuszających i wzmocnień toru pomiarowego dla tomografu opartego na wymuszeniu sinusoidalnym – AC-based (Yang i York, 199; Yang, 2001), opis tej techniki pomiaru pojemności został w skrócie przedstawiony w rozdziale 4. Miernik LRC umożliwia zmianę częstotliwości i amplitudy sygnału wymuszającego w zakresie  $100\text{kHz} \div 1.5\text{MHz}$  oraz  $1 \div 15\text{V}$ . Wykresy na rysunku 19 przedstawiają wyniki różnic między pełnym a pustym czujnikiem ( $\Delta C = C_{\text{pełny}} - C_{\text{pusty}}$ ) dla różnych odległości międzyelektrodowych. Amplituda przyjmowała wartość: 1, 5, 10 oraz 15V przy częstotliwości z zakresu  $100 \div 1500\text{kHz}$ . Wpływ amplitudy na sygnał pomiarowy nie był widoczny, natomiast zmiany częstotliwości sygnału wymuszającego znacząco uwidoczniły się w sygnale pomiarowy. Dla niskich częstotliwości występują największe różnice między pustym a pełnym czujnikiem. Wpływ ten zwiększa się wraz ze wzrostem odległości między elektrodami (rysunek 19b). Wzrost częstotliwości do 1.5MHz w przypadku naprzeciwległych elektrod powoduje spadek różnicy  $\Delta C$  do kilku femtoFaradów. Dla takich

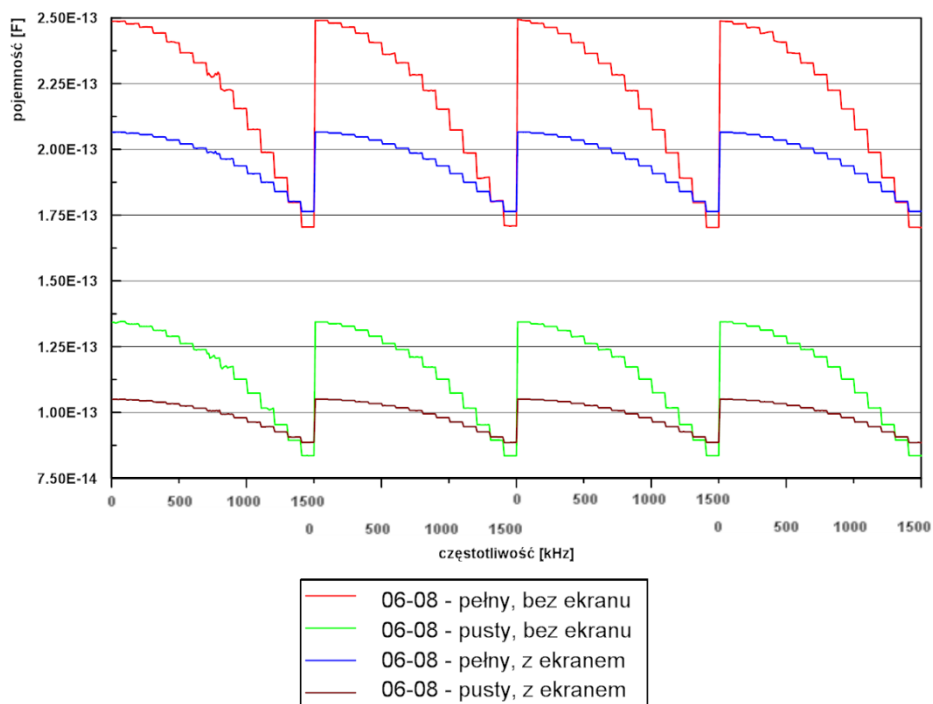
parametrów sygnału wymuszającego poziom szumu w sygnale pomiarowym może znacząco zakłócić pomiar przepływu grawitacyjnego.



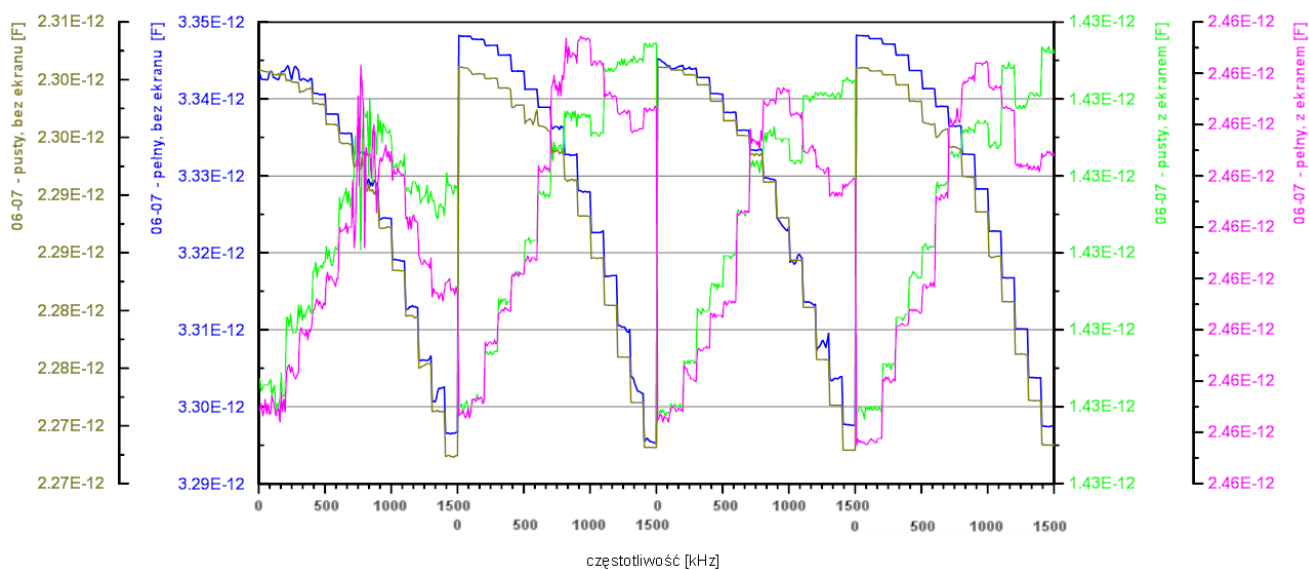
Rysunek 19. Pomiar statycznego rozkładu materiału w obszarze czujnika ECT, a) charakterystyka zmian pojemności ( $\Delta C = C_{\text{pełny}} - C_{\text{pusty}}$ ) w funkcji częstotliwości sygnału wymuszającego dla par elektrod przyległych b) charakterystyka zmian pojemności ( $\Delta C = C_{\text{pełny}} - C_{\text{pusty}}$ ) w funkcji częstotliwości sygnału wymuszającego dla par elektrod oddalonych o 2 –  $C_{i, i+2}$ , 3 –  $C_{i, i+3}$ , 4 –  $C_{i, i+4}$  elektrody.

Przygotowany czujnik wewnętrzny został również poddany ocenie pod kątem wpływu obecności pełnego zewnętrznego ekranu. Na rysunku 20 pokazano wpływ pełnego ekranu zewnętrznego na zakres pomiarowy pojemności między przykładowymi parami elektrod, dla pary elektrod przyległych  $C_{6,7}$  oraz oddalonych o 2 elektrody  $C_{6,8}$ . Podobnie jak to miało miejsce dla analizy wpływu częstotliwości oraz amplitudy sygnału wymuszającego na zakres pomiarowy analiza dotyczyła zakresu częstotliwości 100÷1500kHz oraz 1÷5V. W przypadku par elektrod oddalonych od siebie o 2 długości elektrod obecność pełnego ekranu przesunęła zakres pomiarowy (między pełnym a pustym czujnikiem) w stronę mniejszych wartości pojemności, zmniejszając również w niewielkim stopniu rozpiętość tego zakresu. W przypadku elektrod przyległych (sąsiednich) obecność pełnego ekranu zewnętrznego, dla wewnętrznego czujnika o grubości ścianki zbiornika 1cm, utrudnia znacznie interpretację wyników. Wynika z nich, że obecność pełnego ekranu zewnętrznego zmniejsza wpływ częstotliwości sygnału wymuszającego na zakres pomiarowy, a najwyższe wartości pomiarowe w tym przypadku otrzymujemy dla średnich częstotliwości (między 700kHz a 1.1MHz).

Zakres pomiarowy w tym przypadku jest większy niż ma to miejsce dla czujnika z częściowym ekranem zewnętrznym.



a)

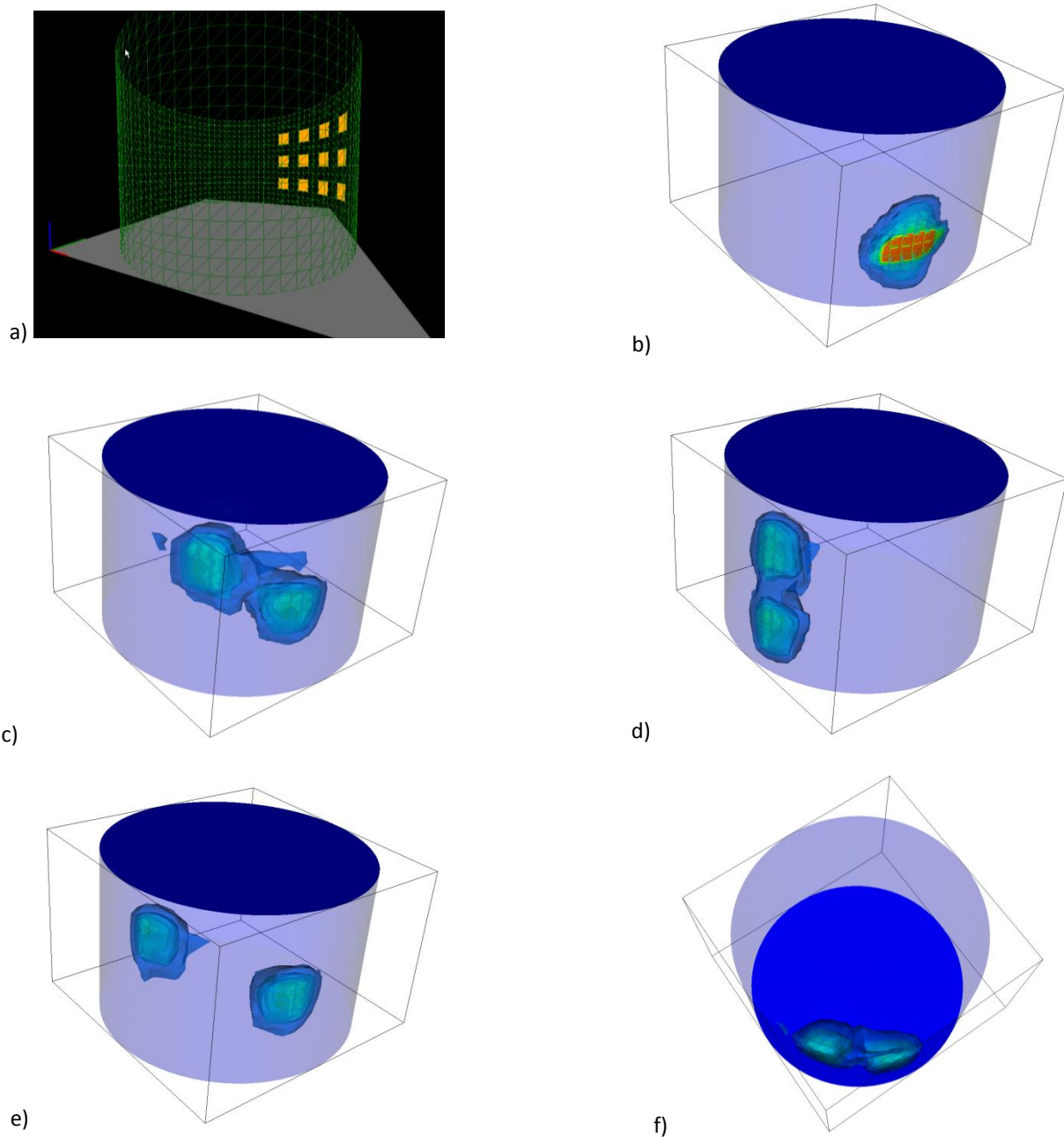


b)

Rysunek 20. Porównanie zmian wartości pomiarowych dla wewnętrznego czujnika ECT z pełnym i częściowym ekranem zewnętrznym, a) pary elektrod oddalone o 2 długości elektrod, b) para elektrod sąsiadujących

Wyniki otrzymane z obliczeń czułości pomiarowej dla czujnika o średnicy 0.65 m oraz pomiary przeprowadzone dla statycznych rozkładów materiału dla rzeczywistego czujnika spowodowały konieczność zmiany koncepcji czujnika ECT dla krępego silosu. Przeprowadzona symulacja komputerowa dla czujników 2D ECT dla silosu krępego o średnicy 1.5 m pokazała brak możliwości pomiaru zmian koncentracji materiału sypkiego w części centralnej silosu. Przygotowana analiza numeryczna pola elektrycznego pokazała, że w przypadku tak dużego zbiornika pomiar naprzeciwległych elektrod jest mało realny. Czułość pomiarowa w środku zbiornika jest zdecydowanie mniejsza niż to miało miejsce dla czujnika przygotowanego do wizualizacji zmian koncentracji w zbiorniku smukłym o mniejszej średnicy. Dodatkowo,

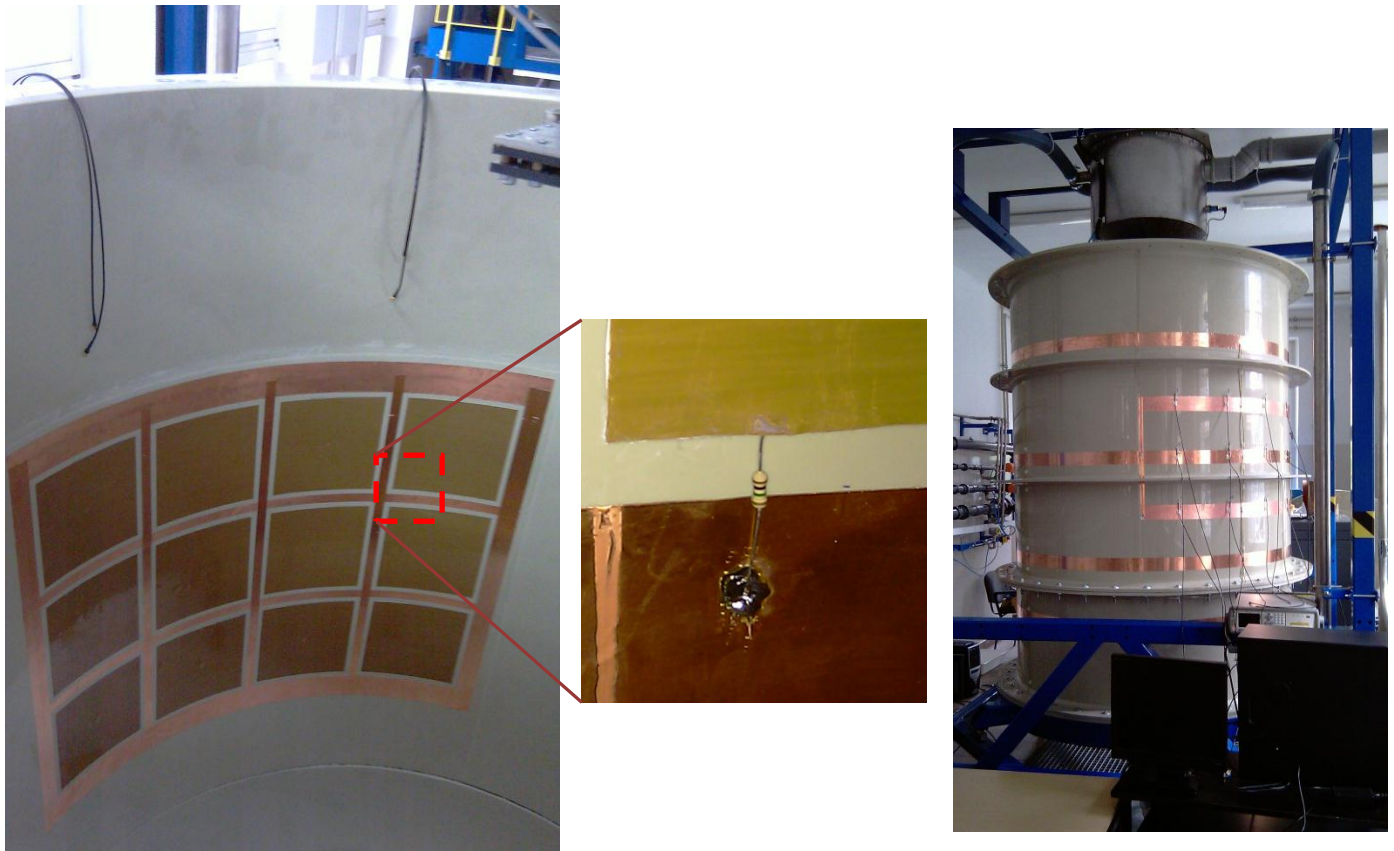
przygotowanie tak dużych elektrod pomiarowych (długość na poziomie 1m) nie pozwoliłoby dokonać pomiaru tomografem ECT, pojemności międzyelektrodowe sięgały wartości kilkunastu pikofaradów w przypadku wypełnienia granulatem. Wykonawcy projektu zaproponowali alternatywne rozwiązanie, które umożliwi pomiar zmian koncentracji materiału sypkiego w obszarze przyściennym silosu krępego. Zaprojektowany czujnik ECT składał się z 3 poziomów elektrod, a na każdym z nich znajdowały się 4 elektrody. Na rysunku 21a pokazano projektowany rozkład elektrod. Czujnik wraz z ekranem zewnętrznym otaczającym zestaw elektrod obejmuje  $\frac{1}{4}$  obwodu zbiornika. Pozwoliło to na zmniejszenie elektrod (ich długości) przy zachowaniu odpowiedniego poziomu stosunku sygnału do szumu. Rozmiar elektrody wynosi 0.2x0.2m, przerwa między elektrodami to 4 cm, zastosowano również ekran promieniowy między elektrodami o szerokości 2 cm. Na rysunku 21 pokazano mapy czułości pomiarowej dla wybranych par elektrod.



Rysunek 21. Wizualizacja map czułości dla wybranych elektrod czujnika ECT, a) rozmieszczenie elektrod, b) mapa czułości między przyległymi elektrodami z dwóch poziomów, c) mapa czułości między naprzeminoległymi elektrodami z dwóch poziomów, d) mapa czułości między

elektrodami ze skrajnych poziomów czujnika, e) mapa czułości dla najbardziej oddalonych elektrod w czujniku, f) widok z góry pokazujący zakres pomiaru w głębi czujnika.

Wykonany czujnik (Rys. 22) zawiera dodatkowe rezystory 1M $\Omega$ , które łączyły elektrody pomiarowe z ekranem czujnika. Zadaniem rezystora było odprowadzenie nadmiarowego ładunku elektrostatycznego wytwarzanego w trakcie opróżniania zbiornika.

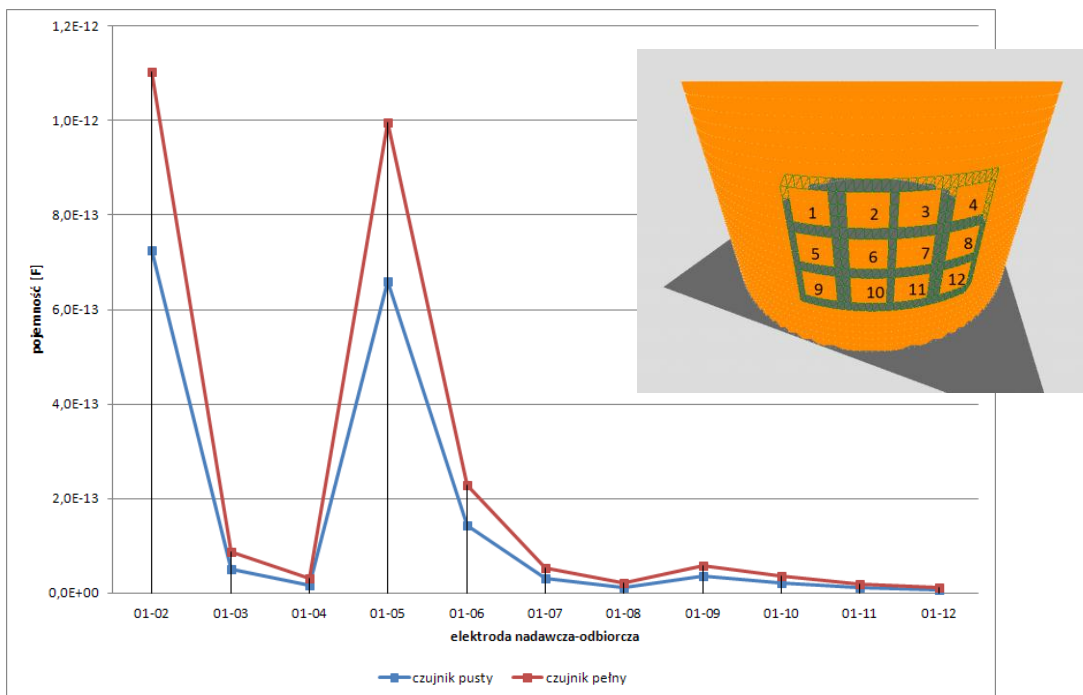


a)

b)

Rysunek 22. Zdjęcie czujnika pomiarowego 3D ECT, a) widok czujnika 3D ECT od strony wnętrza silosu, b) widok ekranów zewnętrznych czujnika 3D ECT

Podobnie, jak to miało miejsce dla czujnika 8-elektrodowego, w celu weryfikacji poprawności jego wykonania dokonano pomiaru pojemności międzyelektrodowych dla pustego i pełnego obszaru pomiarowego. Na rysunku 23 pokazano rozkład danych pomiarowych dla poszczególnych par elektrod dla elektrody pierwszej jako elektrody nadawczej. Użyto sygnału wymuszającego o częstotliwości 200kHz oraz amplitudzie 10V. Rozkład różni się znacząco od rozkładu pomiarów dla czujnika 2D ECT. Kształt otrzymanej krzywej wynika z numeracji poszczególnych elektrod w czujniku 3D ECT, gdzie największe pomiary zaobserwować można dla par elektrod leżących w sąsiedztwie. Natomiast brak różnic w pomiarze między pełnym i pustym obszarem czujnika dla najbardziej odległych elektrod spowodowały, że ich interpretacja i ich dalsza analiza jest niecelowa. W zadaniu nr 5 dotyczącym analizy i przetwarzania danych pomiarowych została opisana analiza danych z wykluczeniem najdalszych par elektrod.



Rysunek 23. Rozkład wartości pomiarowych według numeru elektrody odbiorczej dla pełnego (kol. czerwony) oraz pustego (niebieski) czujnika ECT

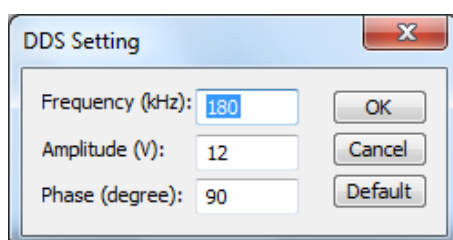
#### 4. Opracowanie aplikacji do automatycznego doboru wzmocnień kanałów pomiarowych w tomografii pojemnościowym względem zastosowanego czujnika ECT

Celem zadania było przygotowanie aplikacji pozwalającej na optymalny dobór wzmocnień kanałów pomiarowych tomografu dla zadanego czujnika pojemnościowego. W posiadaniu wykonawców grantu znajdowały się dwa tomografy: ECT\_T1 tomograf oparty o metodę pomiaru *charge/discharge* (Olszewski i inni, 2004) oraz tomograf *AC-based* ECT\_T2 (Yang, 2001). Metoda pomiaru, na której bazuje tomograf ECT\_T1, polega na cyklicznym ładowaniu i rozładowaniu mierzonej pojemności. W trakcie ładowania mierzony jest ładunek elektryczny dostarczony do pojemności za pomocą układu wzmacniacza operacyjnego, pracującego jako miernik ładunku, podobnie ładunek jest mierzony w fazie rozładowania pojemności, jednak w tej fazie uzyskujemy przeciwny znak sygnału na wyjściu wzmacniacza operacyjnego, działającego w konfiguracji pomiaru ładunku. Zasada pracy tomografu T2 opiera się pomiarze wymuszającego sygnału sinusoidalnego przetransferowanego przez mierzoną pojemność. Sygnał wymuszający generowany jest przez cyfrową syntezę częstotliwości (ang. DDS), co dzięki możliwości swobodnej zmiany częstotliwości referencyjnej w szerokim zakresie znacząco uelastycznia układ. Specyfika pomiarowa oraz własności tomografu *AC-based* zostały poddane testom porównawczym z tomografem pojemnościowym ECT\_T1 (oznaczanego jako *CD-based* – *charge/discharge*).

W ramach tego zadania podjęto również próbę zaprojektowania układów pomiaru pojemności elektrycznej, których lokalizacja bezpośrednio przy elektrodach pomiarowych pozwoliłaby wyeliminować istniejące ograniczenie odległości między parami elektrod. Organicznie to związane jest z długością przewodu między czujnikiem a tomografem ECT. Różniczkująca metoda pomiaru pojemności bazuje na zależności między napięciem na okładkach kondensatora, a prądem. Sygnał wymuszający w postaci przebiegu trójkątnego pozwala na zmianę szybkości narastania zbocza sygnału, co przy dużej dynamice umożliwi pomiar pojemność rzędu fF przy znacznym odstępstwie od amplitudy szumu. Przy zastosowaniu generatora DDS regulacja szybkości narastania zbocza sygnału wymuszającego jest płynna, dzięki czemu stosowanie w torach pomiarowych wzmacniaczy programowalnych (PGA) nie jest konieczne. Opracowywana metoda, podobnie jak metoda *AC-based* nie wymaga sygnału referencyjnego, co ma

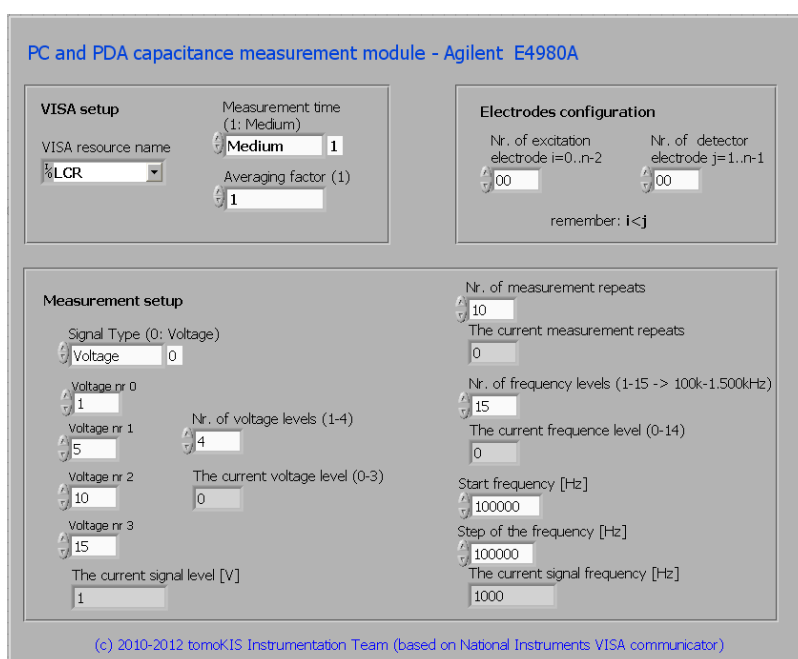
istotne znaczenie przy znacznych odległościach między kanałami pomiarowymi (rozmiary silosów i rozmieszczenie elektrod). Ta część prac ukończona została przeprowadzonymi wstępnymi symulacjami oraz budową układu do pomiaru pojemności tylko między dwoma okładkami kondensatora. Niestabilność wzmacniaczy operacyjnych w konfiguracji różniczkującej znacznie zmniejsza możliwość pomiaru małych wartości pojemności (rzędu fF), spowodowane jest to koniecznością stosowania dodatkowych pojemności stabilizujących pętlę sprzężenia zwrotnego wejściowego wzmacniacza pomiarowego. Zaobserwowano również podatność układu na ładunki statyczne gromadzone na okładkach czujników pomiarowych. Wymienione problemy spowodowały zrezygnowanie z zastosowania nowego projektu pomiaru pojemności na rzecz tomografu T1 oraz T2.

Tomograf T1 umożliwia dokonywanie bezpośrednich zmian wzmocnień wszystkich parametrów torów pomiarowych. W przypadku tomografu T2 wykonana w tym zadaniu praca polegała na wyznaczeniu optymalnych parametrów sygnału wymuszającego (Rys. 24). Sygnał sinusoidalny generowany jest przez cyfrową syntezę częstotliwości (DDS).



Rysunek 24. Okno aplikacji ECTGUI tomografu T2 służące do zadania parametrów sygnału wymuszającego

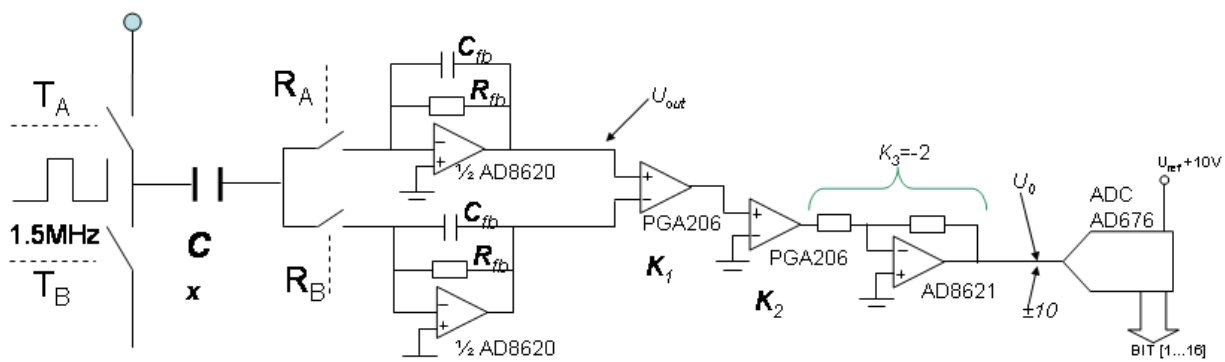
Układ ten umożliwia zmianę amplitudy sygnału, fazę oraz częstotliwość. Bezpośredni dobór parametrów tego sygnału w przypadku tomografu T2 nie jest możliwy, w związku z brakiem specyfikacji komunikacji ze sprzętem. Dobór optymalnych parametrów sygnału dokonany został przy pomocy miernika Agilent. Przygotowana aplikacja do komunikacji z miernikiem pozwala przeprowadzić akwizycję danych pomiarowych dla nastaw z danego zakresu częstotliwości oraz amplitudy. Pomiary dokonywane były dla sygnału generowanego w zakresie częstotliwości od 100kHz do 1.5MHz, zaś amplituda zmieniała się w zakresie od 1 do 20V. Przygotowana aplikacja w środowisku LabVIEW pozwalała dokonać w sposób automatyczny serię pomiarów dla zadanego przedziału parametrów sygnału (Rys. 25).



Rysunek 25. Widok okna głównego aplikacji do komunikacji z miernikiem LCR Agilent.

Dla jednej pary parametrów częstotliwość – amplituda wykonywane było N powtórzeń pomiarów, a następnie uśredniano ich wyniki w celu wyeliminowania wpływu szumu pomiarowego. Wyniki pracy przygotowanej aplikacji zostały przedstawione w poprzednim podpunkcie raportu. Wybór optymalnych parametrów sygnału wymuszającego dokonywany był poprzez wyznaczenie największej różnicy między pełnym oraz pustym czujnikiem dla wszystkich par elektrod. Wyznaczone parametry sygnału zostają podane do okna ustawień sygnału DDS (Rys. 24). Tomograf na podstawie danych pomiarowych dla pustego oraz pełnego czujnika ECT dokonuje automatycznego doboru wzmocnień w układzie PGA, dobierając wartości ze zbioru {1,2,4,8,16}. Analiza pliku kalibracyjnego pozwala uzyskać informacje o jakości sygnału, jeśli dobrane wzmocnienia są zbyt duże (gdy większość osiąga wartość 16) lub zbyt małe (większość wartości 1, 2) należy dokonać korekty parametrów sygnału wymuszającego.

W przypadku tomografu T1 zmiany nastaw parametrów wzmocnień sygnału pomiarowego dokonywane być mogły bezpośrednio z wykorzystaniem tomografu. Budowa kanału pomiarowego pozwala na dobór wartości wzmocnień dla czterech układów znajdujących się w torze pomiarowym: dwóch wzmacniaczy  $K_1$  i  $K_2$ , rezystora  $R_{fb}$  oraz kondensatora  $C_{fb}$ . Na rysunku 26 pokazano schemat kanału pomiarowego z zaznaczeniem elementów wpływających na wzmocnienie sygnału pomiarowego



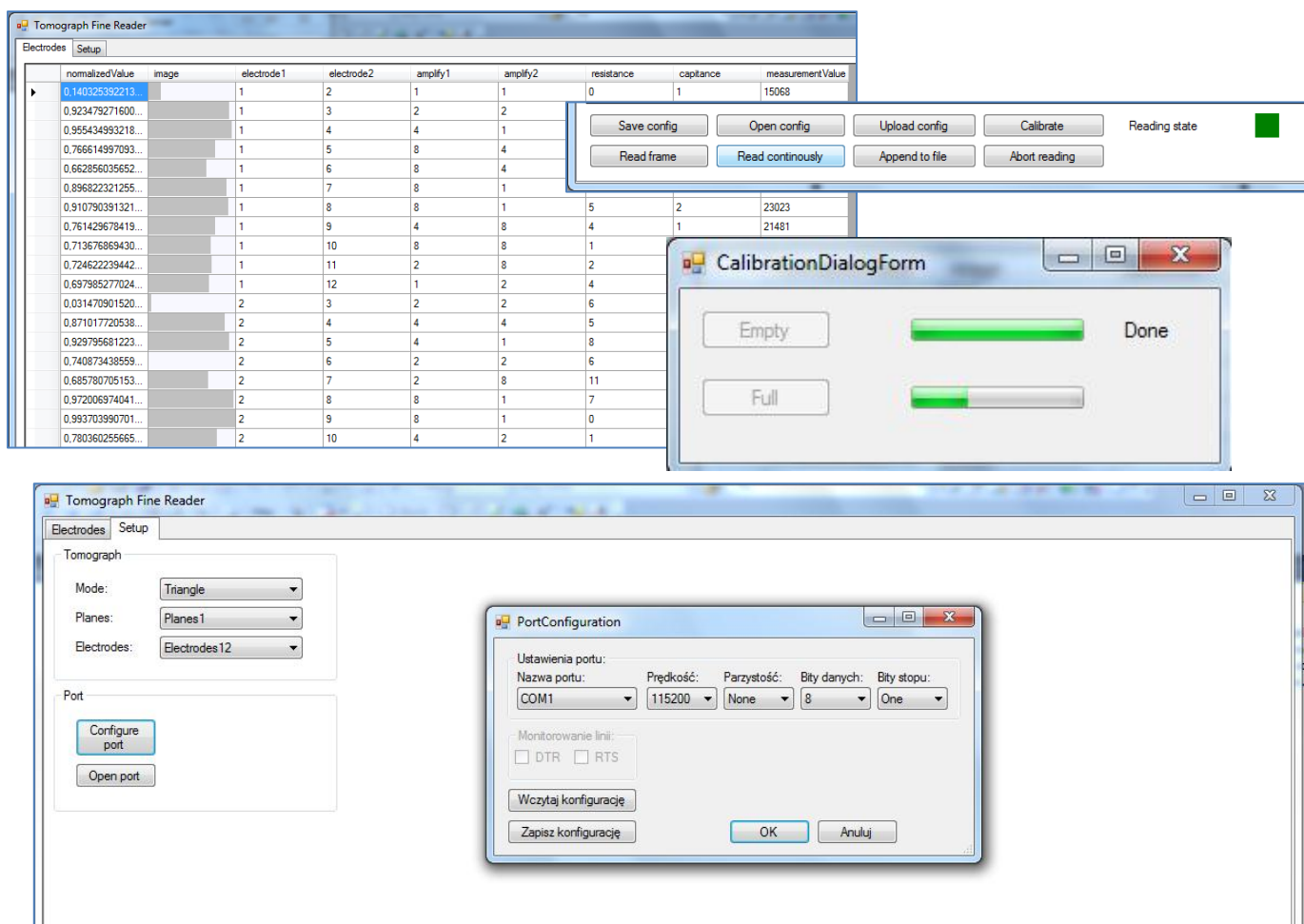
Rysunek 26. Tor pomiarowy pojemności elektrycznej między parą elektrod dla tomografu T1

Wybór wartości parametrów dla poszczególnych elementów układu dokonywany jest przez wybór kombinacji zestawu z poszczególnych zbiorów możliwych ustawień:

- rezystancja {0,1; 1,6; 2,5; 4;6;10;16;25,40,100,Inf} [kΩ];
- pojemność {1,5; 4,7;33;100} [nF];
- wartość wzmocnienia dla układu PGA  $K_1$  {1,2,4,8};
- wartość wzmocnienia dla układu PGA  $K_2$  {1,2,4,8};

Przygotowana aplikacja (Rys. 27) komunikuje się z tomografem przez port RS232 wysyłając w odpowiednim formacie wartości parametrów dla tych 4 elementów. Następnie zbierane są wartości pomiarowe dla wszystkich par elektrod czujnika ECT. Czynność jest powtarzana dla każdej możliwej kombinacji wartości wzmocnień. Dobór wzmocnień dokonywany jest w dwóch etapach: seria pomiarów dla czujnika pełnego oraz seria pomiarów dla czujnika pustego. Podobnie, jak to było w poprzednim przypadku, wybierana jest taka kombinacja wartości parametrów, która powoduje powstanie największej różnicy wartości pomiarowych dla pomiarów czujnika pełnego oraz pustego. Po zakończeniu automatycznego doboru wzmocnień istnieje także możliwość manualnej korekty wartości parametrów dla poszczególnych kanałów pomiarowych.





Rysunek 27. Widok działającej aplikacji do komunikacji z tomografem ET3

## 5. Opracowanie aplikacji do analizy i przetwarzania danych tomograficznych.

Zadanie dotyczyło opracowania poszczególnych modułów przetwarzających dane pomiarowe, począwszy od akwizycji danych pomiarowych, a kończąc na analizie uzyskanych wyników. W zadaniu można wyróżnić trzy moduły:

- akwizycja danych pomiarowych z systemu wag tensometrycznych, układu akcelerometrów oraz surowych danych tomograficznych;
- rekonstrukcja obrazów tomograficznych, zarówno metodami bezpośrednimi jak również iteracyjnymi, włączając metody nieliniowe.
- wizualizacja i analiza danych pomiarowych.

W zadaniu tym zostały również uwzględnione przeprowadzone serie pomiarów.

### 5a)

Pierwszą częścią prac w poniższym zadaniu było przygotowanie oprogramowania do akwizycji danych z czujników ulokowanych w systemie przepływu grawitacyjnego. Rejestracja danych tomograficznych odbyła się za pomocą aplikacji przygotowanej w poprzednim zadaniu, pozwalającej dokonać nastaw toru pomiarowego. W zależności od rodzaju narzędzia pomiarowego system akwizycji dokonywany był aplikacją przygotowaną w środowisku LabVIEW (rysunek 25) w przypadku użycia miernika LCR, bądź, jak to miało miejsce w przypadku tomografu T2 – AC-based, użyto aplikacji natywnej. Akwizycja danych z tomografu T1 – charge/discharge dokonywana była przed dodatkowe

Control multiple accelerometer devices and scales connected to a one data-gathering computer via a network switch is a part of the common control and measurements software, based on synoptic table idea (fig. 4). Developed wireless process monitoring enables the users to review the state of particular sensors using text- or chart-based representations (Fig. 4) and reviewing images from the immediate vicinity of the silo (Fig. 5). Allows user to control all devices at once, e.g. start or stop acquisition in all devices, set measurement frequency, offset voltages or gains. User can also select only some of the available devices. All data obtained from scales and network accelerometers is stored in text files along with information of frequency, gains and offsets for further evaluation and processing. Besides monitoring on-line is possible to conduct off-line analysis.

The application communicates with the weight and acceleration sensors through an NI measurement board. The PC & PDA flow control & measurement system makes it possible to control the filling and emptying of the silos and obtain measurements using scales, accelerometers and tomographs. The compressor, blower, pneumatic valve and outlet valve show the current state of several of the system's parts. A measurement from the ECT sensors provides information on the changes in material concentration during emptying. Key pieces of information are automatically transferred to the researcher's PDA and, consequently, the employees do not have to monitor the process at all times. When a predefined event occurs, the system automatically notifies the relevant staff member through a personalised SMS-based alert containing all the necessary data. The engineer is then able to perform the actions necessary to deal with issue.

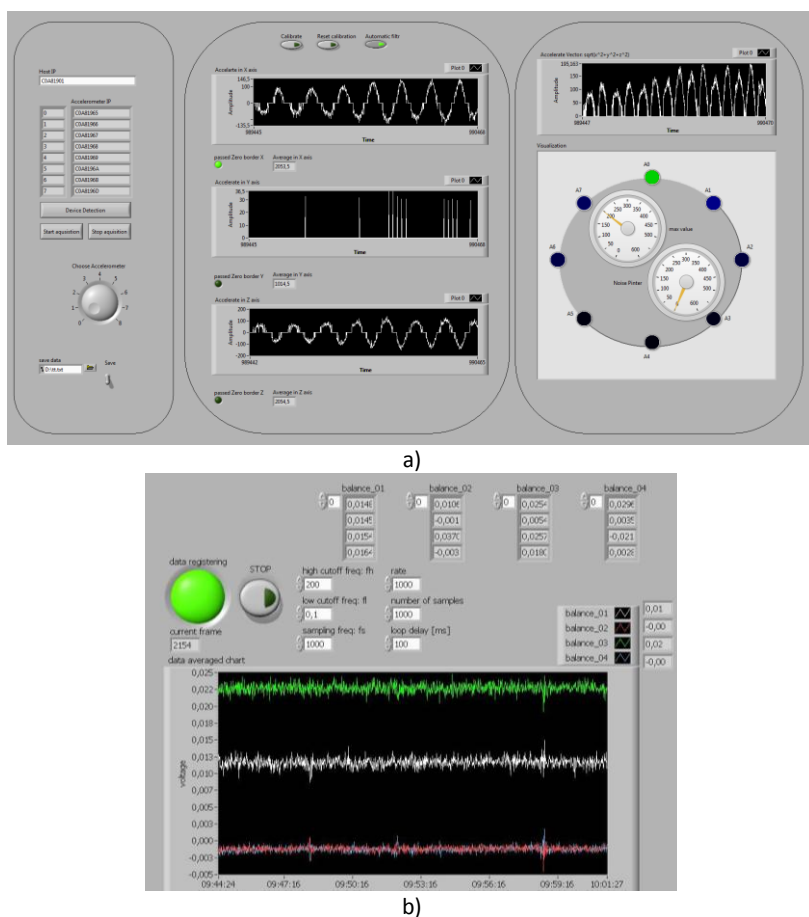


Fig. 4. User interface control and monitoring PC screen  
a) accelerometer modul, b) tensometer modul

Application includes modules for communication, data processing and visualization for set of accelerometers and tensometers. For better visualization of symmetrical or non-symmetrical flow we can observe the changes on each sensor using text-digit form and graphical representation of the measured data. For accelerometer visualisation was

implemented methods of signal analysis, which allows to observe level of signal changes in form of diode colour distributed around circle-represented cross-section of silo. The application allows to user define optional point of maximum level of signal. Such approach causes ability to upgrade hardware to expected level of signal. The red colour diode represents maximum level of signal. It is possible to set the threshold of the noise, below them the measured data are not analysed.

The software application allows signaling characteristics and critical states by generated sound signal. Information about achieving the required signal level is visualized on screen or send by e-mail, SMS, to the system operator.

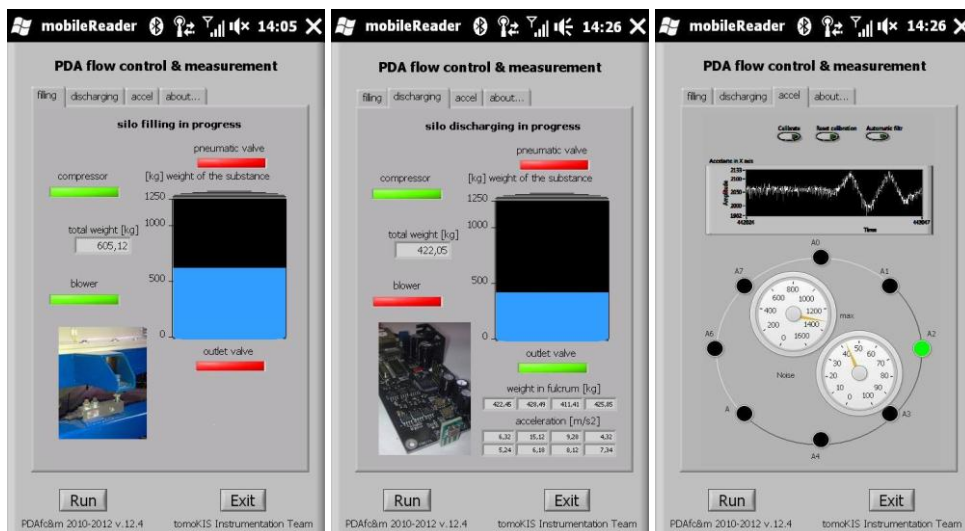
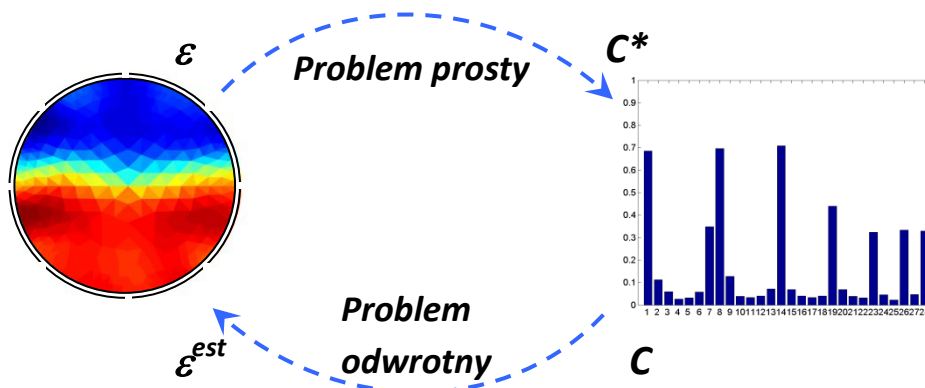


Fig. 5. User interface control and monitoring PDA screens

5b)

5b) Możliwość wizualizacji wnętrza badanego procesu przemysłowego stanowi jedną z głównych zalet tomografii procesowej. W wyniku przeprowadzenia procesu rekonstrukcji, na podstawie zebranych pomiarów uzyskuje się obraz obszaru pomiarowego będący odzwierciedleniem przybliżonego rozkładu relatywnej przenikalności elektrycznej materiałów znajdujących się w przestrzeni pomiarowej czujnika. W przypadku przepływów materiałów sypkich wartości pikseli w zrekonstruowanym obrazie są powiązane bezpośrednio z koncentracją materiału w obszarze tego piksela. W celu otrzymania obrazu 2D lub 3D należy rozwiązać tzw. problem odwrotny. Klasycznym, również zastosowanym w projekcie, wynikiem rozwiązania problemu odwrotnego w przypadku tomografii pojemnościowej jest przestrzenny rozkład przenikalności elektrycznej  $\epsilon$  wewnątrz obszaru czujnika (Rys. 28), znaleziony na podstawie zebranych pomiarów pojemności  $C$  z granic badanego obiektu (Isaksen, 1993; Xie, 1995; Yang i inni, 1999; Wajman i inni, 2001; Yang, 2003; Lionheart, 2004).



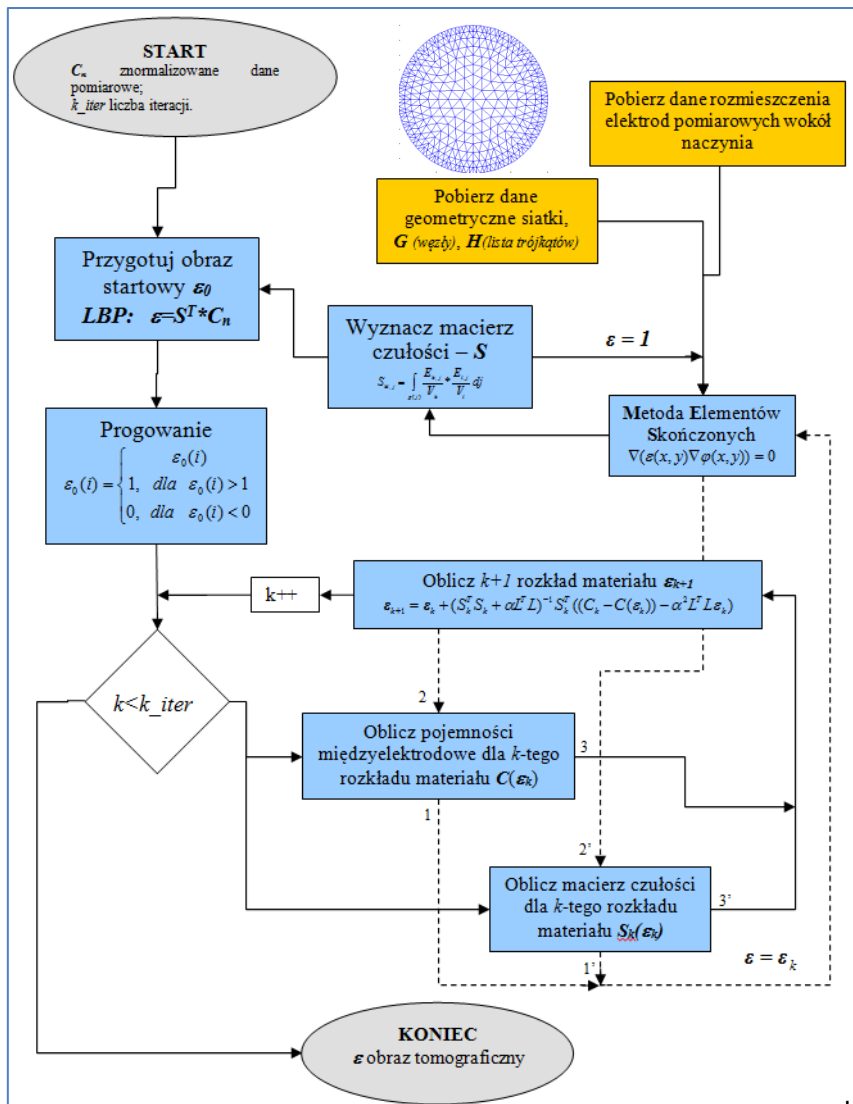
Natomiast rozwiązaniem problemu prostego, o którym była mowa w rozdziale 2, jest obliczony zbiór znormalizowanych pojemności międzyelektrodowych  $\mathbf{C}$  dla znanego rozkładu materiału wewnątrz obszaru objętego czujnikiem.

Problem odwrotny w przypadku pojemnościowej tomografii procesowej, jak i pozostałych rodzajów tomografii elektrycznej, jest przykładem zagadnienia nieliniowego (droga sygnału pomiarowego jest zależna od rozkładu materiału w przestrzeni czujnika), pod-określonego (liczba danych – pomiarów, jest znacznie mniejsza od liczby szukanych – wartości pikseli w obrazie) źle postawionego oraz źle uwarunkowanego (duże zmiany w rozkładzie przenikalności dielektrycznej powodują niewielkie zmiany w pomiarach pojemności) problemu odwrotnego. Przy rozwiązywaniu nieliniowego problemu odwrotnego dla tomografii pojemnościowej, przy niewielkich różnicach w przenikalności dielektrycznej materiałów występujących w procesie przemysłowym ( $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ ) można zastosować uproszczenie polegające na linearyzacji nieliniowego problemu (Yang i Peng, 2003; Gamio i Ortiz-Aleman, 2003). W tym przypadku zazwyczaj stosowana jest liniowa projekcja wsteczna. Użyty granulat (HDPE) w pomiarach przepływu grawitacyjnego charakteryzuje się względną przenikalnością elektryczną równą 2,35 dla formy pełnej oraz 1,7÷1,8 w formie nasypowej. Taki poziom porowatości pozwala przy rekonstrukcji obrazów zastosować algorytmy liniowe. Jednak w celu uzyskania lepszych wyników rekonstrukcji możliwe jest zastosowanie także metod nieliniowych, iteracyjnych opartych na technikach regularyzacji. W takim przypadku, w każdym kroku iteracyjnym obliczana jest macierz czułości (dla kolejnych rozkładów przenikalności elektrycznych) oraz wyznaczane są numerycznie nowe pojemności międzyelektrodowe (Lionheart i inni, 1999; Wajman i inni, 2001; Lionheart, 2004; Soleimani i inni, 2005). Zbieżność algorytmu iteracyjnego polega na minimalizacji różnicy pomiędzy mierzonymi, a obliczonymi numerycznie wartościami pojemności elektrycznej. Równanie pokazujące proces rekonstrukcji obrazu metodą nieliniową oparte na rozwiązaniu algorytmem Gaussa-Newtona (GN) można zapisać (równanie 1.):

$$\hat{g}_{i+1}^{\alpha} = \hat{g}_i^{\alpha} + (s_i^T s_i + \alpha L^T L)^{-1} (s_i^T (C - C^*(\hat{g}_i^{\alpha})) - \alpha L^T L \hat{g}_i^{\alpha}), \quad (1)$$

gdzie  $s_i$  jest macierzą czułości obliczoną w  $i$ -tej iteracji,  $C^*$  to obliczone numerycznie pojemności (np.: przy pomocy np.: MES) dla znanego rozkładu przenikalności  $\hat{g}_i^{\alpha}$ ,  $L$  jest macierzą regularyzacji,  $\alpha$  jest parametrem regularyzacji.

Dla przyspieszenia obliczeń stosuje się często uproszczenie, w którym macierz czułości jest wyznaczana jednorazowo dla jednorodnego wypełnienia obszaru wewnątrz czujnika i w każdym kroku iteracyjnym jest ona niezmienna. Na rysunku 29 przedstawiono schemat sieci działań zaimplementowanego algorytmu rekonstrukcji obrazów tomograficznych metodą nieliniową wg wzoru 1.



Rysunek 29. Sieć działań algorytmu nieliniowej metody rekonstrukcji obrazów

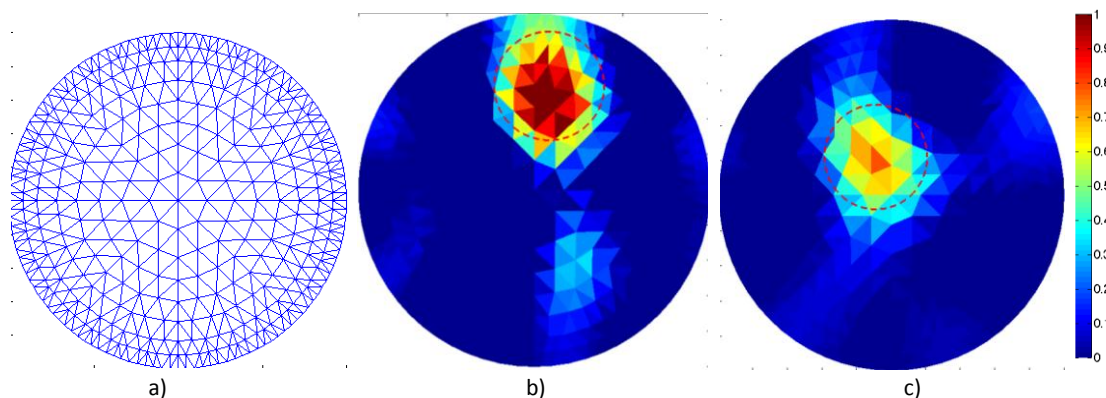
Zaimplementowany algorytm rekonstrukcji przetestowano w oparciu o dane pomiarowe uzyskane dla położenia jednorodnego fantomu o średnicy 192mm w czujniku 2D ECT (Rys. 30). Rekonstrukcję przeprowadzono dla fantomu znajdującego się w odległości 3 cm i 15cm od elektrod czujnika.



Rysunek 30. Przykładowe położenia jednorodnego obiektu w obszarze pomiarowy (w odległości 3 i 14 cm od elektrod),

Proces rekonstrukcji obrazu metodą nieliniową przeprowadzony został przy użyciu przygotowanej wcześniej siatki elementów dyskretnych o kształcie trójkąta na jaką podzielony został obszar czujnika (Rysunek 31a). Siatka składa się z 704 elementów - pikseli. Liczba elementów została dobrana w sposób, który nie wydłuża znacznie czasu obliczeń oraz dodatkowo stopień szukanych danych (wartości pikseli) w stosunku do liczby danych (wartości pomiarowych) jest na poziomie zbliżonym do zastosowań

przemysłowych tomografii ECT do monitorowania procesów w czasie rzeczywistym. Wynik rekonstrukcji obrazu został pokazany na rysunku 31a,b. Czerwona przerywana linia pokazuje rzeczywiste położenie obiektu. Różnica w wartości zrekonstruowanych pikseli dla tych dwóch przypadków związana jest z mniejszą czułością pomiarową dla obszaru bardziej oddalonego od elektrod pomiarowych niż dla obszaru przy elektrodach. Jest to typowy efekt (zarówno różnica jak i rozmycie krawędzi obiektów) występujący przy zastosowaniu tomografii ECT i całkowicie potwierdza skuteczność opracowanej metody. Natomiast w razie potrzeby uzyskania obrazu o lepszych parametrach można go poddać dalszemu przetwarzaniu, m.in. pogowaniu w celu wyostreniu krawędzi, itp (ref).



Rysunek 31. Zrekonstruowane obrazy tomograficzne, a) siatka elementów dyskretnych – pikseli, b) zrekonstruowany obraz obiektu w pobliżu elektrod pomiarowych, c) zrekonstruowany obraz obiektu w pobliżu centrum czujnika ECT

### 5c) wizualizacja i analiza danych pomiarowych

Obrazy w metodach elektrycznych charakteryzują się niską rozdzielczością przestrzenną, lecz dzięki wysokiej rozdzielczości czasowej pomiarów (nawet do 1000 wektorów pomiarowych na sekundę) ta technika z powodzeniem może być stosowana w systemach monitorowania dynamicznymi procesami przemysłowymi. W systemach diagnostycznych opartych na technikach tomograficznych przeprowadzana jest analiza zarówno obrazów tomograficznych jak i bezpośrednio pobranych danych pomiarowych (pojemności elektrycznych). Prowadzone wcześniej badania z wykorzystaniem technik tomograficznych do pomiaru przepływu materiałów sypkich potwierdziły zależność między zmianą koncentracji materiału sypkiego w obszarze pomiarowym a wartością mierzoną (ref). Zależność ta jest odzwierciedlona również w zrekonstruowanym obrazie tomograficzny, na którym rozkład wartości pikseli jest proporcjonalny do koncentracji materiału. W przypadku mieszaniny dwóch materiałów dielektrycznych wartość każdego piksela oznacza względną zawartości materiału o wyższej wartości przenikalności dielektrycznej (materiał sypki), w stosunku do materiału o niższej wartości przenikalności dielektrycznej (powietrze). Zakres zmian wartości pikseli znajduje się w przedziale  $<0, 1>$ , gdzie wartość 0 odpowiada obecność w obszarze pomiarowym materiału o niższej przenikalności dielektrycznej, a wartość 1 oznacza obecność tylko materiału o wyższej przenikalności dielektrycznej. W przypadku pomiaru przepływów materiałów sypkich często wartości pikseli przekraczają wartość 1, gdyż w trakcie procesu może zaistnieć sytuacja kiedy koncentracja materiału będzie większa niż to miało miejsce podczas kalibracji systemu pomiarowego. Sam proces rekonstrukcji jest procesem wymagającym wykonywania dużej ilości obliczeń co wydłuża czas analizy danych. Przyspieszenie tego etapu możliwe jest dzięki analizie nieprzetworzonych danych pomiarowych (ang. raw data) lub zastosowaniu metod rekonstrukcji szybkich lecz o niższej jakości rezultatów w porównaniu do algorytmów iteracyjnych. W opisywanych pracach badawczych zastosowano wszystkie 3 grupy metod analizy danych tomograficznych: analiza danych pomiarowych, zrekonstruowanych obrazów metodą LBP oraz zrekonstruowanych obrazów metodą iteracyjną, nieliniową.

#### Przepływ materiału sypkiego w silosie smukłym

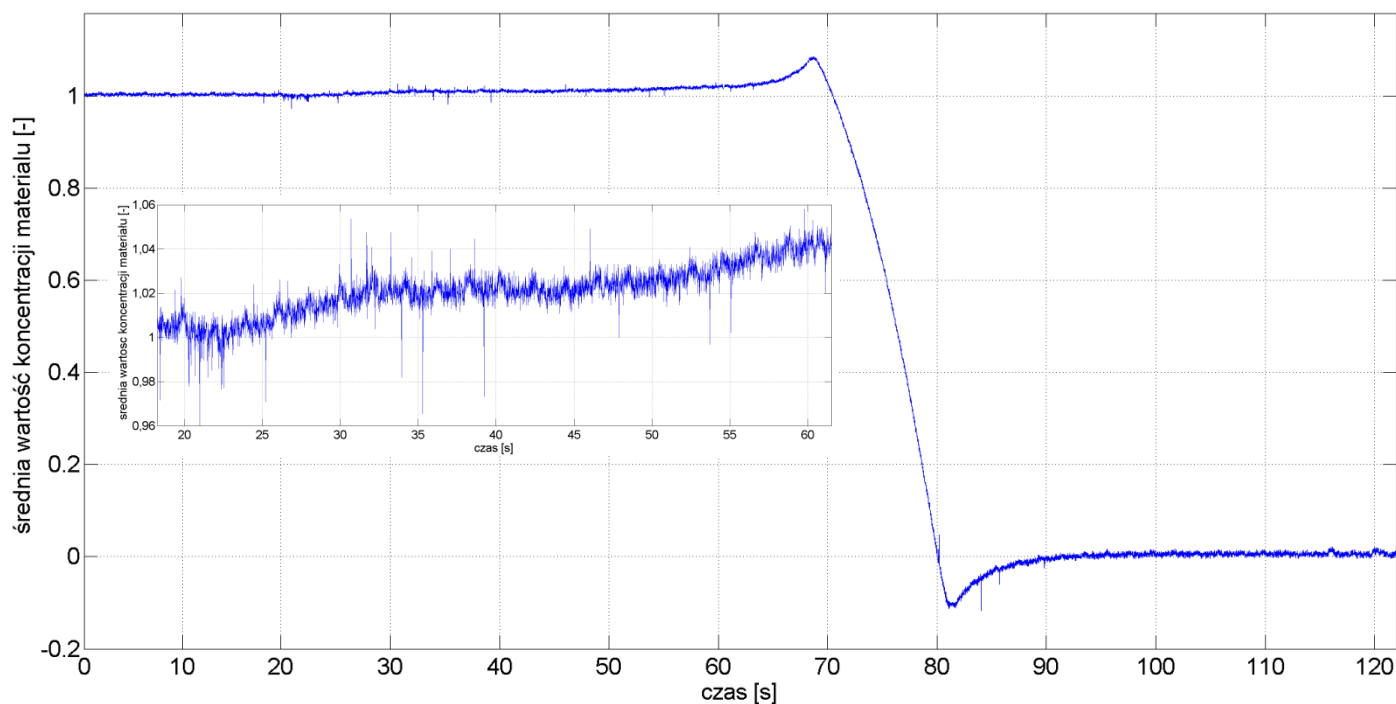
Przygotowane czujniki pomiarowe 8-elektrodowe 2D ECT, opisany w rozdziale 3, zostały ulokowany w silosie w części cylindrycznej na wysokość 4.05 m oraz 2.05 m nad otworem wylotowym.



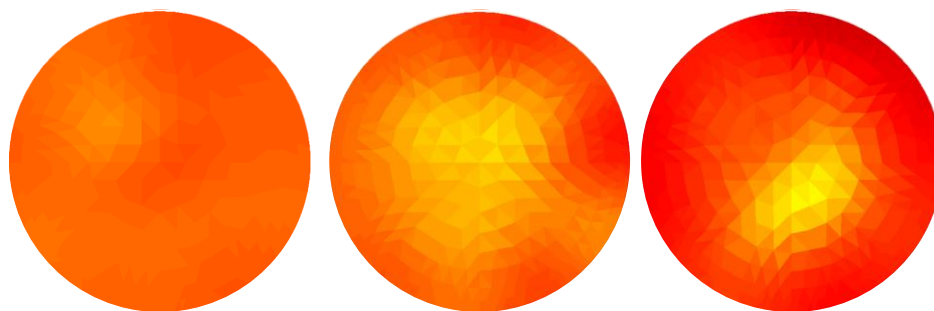
Rysunek. Widok wnętrza silosu z rozmieszczonymi czujnikami ECT.

Pomiaru dokonano dla trzech różnych stopni nachylenia zbocza części stożkowej. Położenie czujnika na wysokości 4.05 związane było z próbą pomiaru interakcji materiału sypkiego z konstrukcją silosu. Jak pokazano w literaturze najistotniejsze efekty dynamiczne, ze względu na monitorowanie zagrożenia, mają miejsce na znacznych wysokościach w sekcji cylindrycznej silosu (ref). Materiałem sypkim, który został

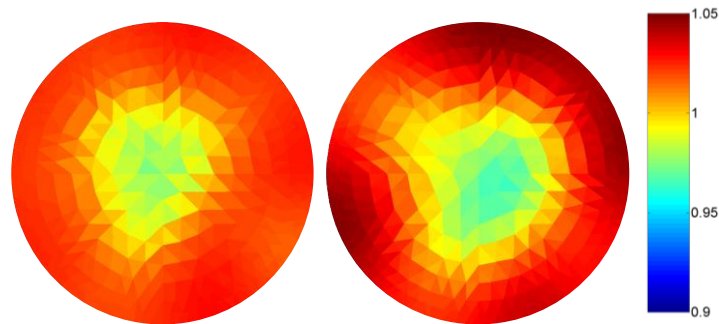
użyty był polietylen o podwyższonej gęstości (HDPE). Wyniki przedstawione poniżej zostały uzyskane przy pomocy tomografu AC-based opisanego w rozdziale 3. Użyty system pozwalał dodatkowo generować sygnał wymuszający na dwie sąsiednie elektrody, co poprawiło czułość pomiarową układu. Wyniki zaprezentowane na rysunku 32 dotyczą zmiany koncentracji materiału upakowanego w sposób luźny (Rys. 33a). Wykres pokazuje średnią zmianę wartości pomiarowych w obszarze czujnika ECT. Uzyskane wartości przekraczające znormalizowaną wartość 1.0 oznaczały wzrost koncentracji materiału. Na wykresie zaobserwować można zwiększanie koncentracji materiału o 2,5 % w stosunku do stanu początkowego. Wzrost między 60 a 70 sekundą na wykresie nie jest związany z faktem zmiany koncentracji materiału, a efektem jaki obserwować można przy pomiarze pojemności, kiedy górna warstwa materiału zbliża się do górnej krawędzi elektrody. Rysunek pokazuje przykładowe zrekonstruowane obrazy w wybranych chwilach czasu procesu rozładunku silosu. Z nich wynika, że średnia zmiana koncentracji w przestrzeni czujnika wzrasta, jednak spowodowane jest to przede wszystkim wzrostem koncentracji w obszarze przyściennym. Natomiast w centrum czujnika obserwować można zmniejszenie koncentracji. Nierównomierny rozkład zmian koncentracji materiału spowodowany jest sposobem nasypywania materiału, gdzie materiał w centrum silosu charakteryzuje się gęstym upakowaniem, natomiast materiał luźno poruszający się po zboczu powstającego nasypu (rysunek) wypełnia obszar przyścienny. Otrzymany rezultat pokazuje poprawny trend zmian koncentracji jaki występuje przy przepływie grawitacyjnym materiału sypkiego w przypadku luźnego upakowania. W badaniach przepływu dla mniejszych zbiorników uzyskany wzrost średniej koncentracji materiału był jednak na wyższym poziomie 6-12% stanu początkowego (ref).



Rysunek 32. Wykres zmian średniej koncentracji materiału sypkiego w obszarze czujnika pomiarowego.





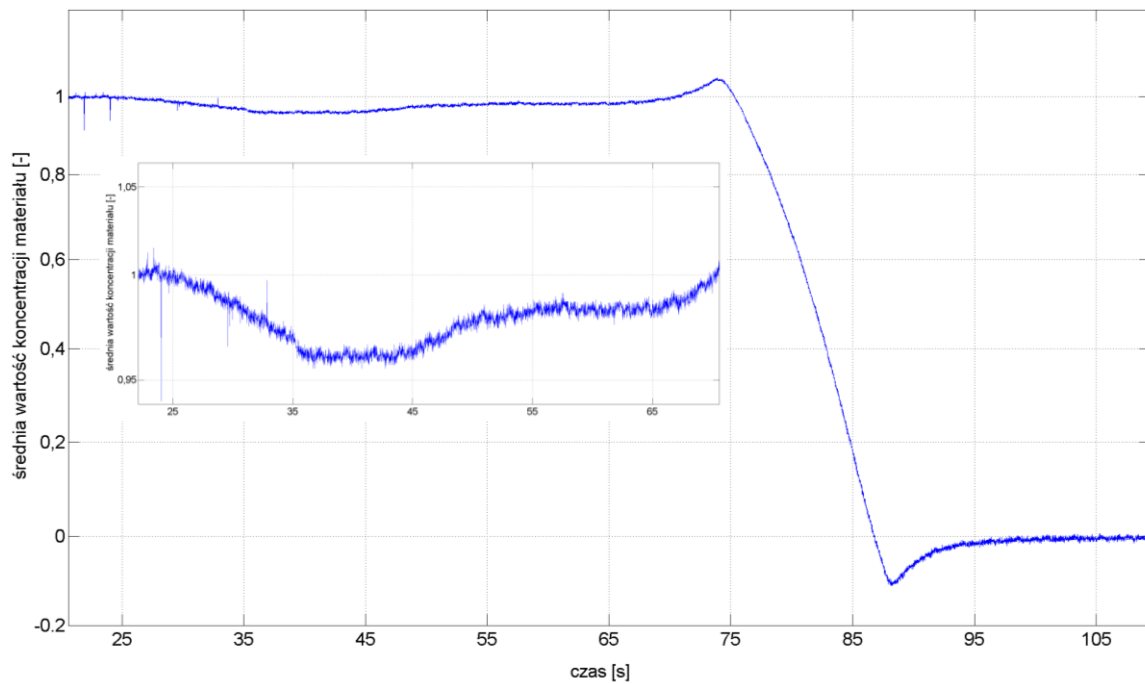


Rysunek Przykładowe zrekonstruowane obrazy metodą G-N dla chwil czasu: 10 s, 25s, 30s, 40, 50 s.

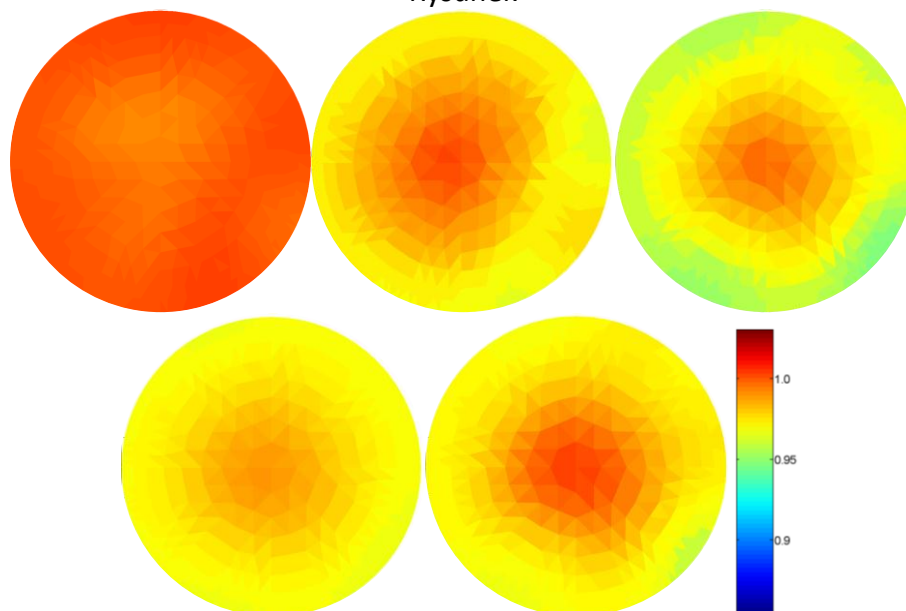


Rysunek 33. Metoda napełniania silosu przy luźnym (a) oraz gęstym (b) upakowaniu początkowym

Rysunek 34 przedstawia wyniki zmian koncentracji dla materiału sypkiego HDPE gęsto upakowanego. Wyniki potwierdzają wiedzę znaną z badań przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich w modelach silosów [7-10, 26-29]. Struktura materiału dla tego typu upakowania zmniejsza swoją koncentrację w trakcie przepływu. Poziome zmiany koncentracji, widoczny na wykresie, charakteryzuje się mniejszą wartością niż to miało miejsce podczas pomiaru dla mniejszych zbiorników (ref). Na rysunku zaprezentowano przykładowe rozkłady koncentracji materiału w obszarze czujnika. Podobnie jak to miało miejsce dla przepływu materiału luźno usypanego, inną wartością cechuje się obszar przyścienny a inny obszar środkowy silosu. W przypadku zaprezentowanych wyników materiał w obszarze przyściennym zmniejsza koncentrację do 5%, podczas gdy obszar centralny do 2%. Dla obu zaprezentowanych przypadków materiał zmienia koncentrację na innym poziomie w obszarze przyściennym oraz centralnym zbiornika. Sytuację taką obserwowano również dla mniejszych modeli zbiorników.

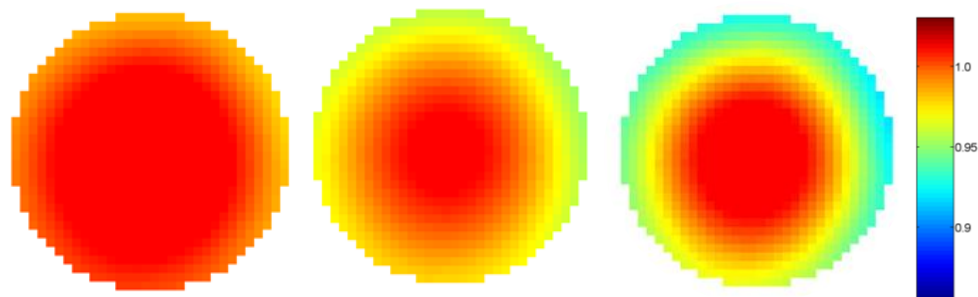


Rysunek

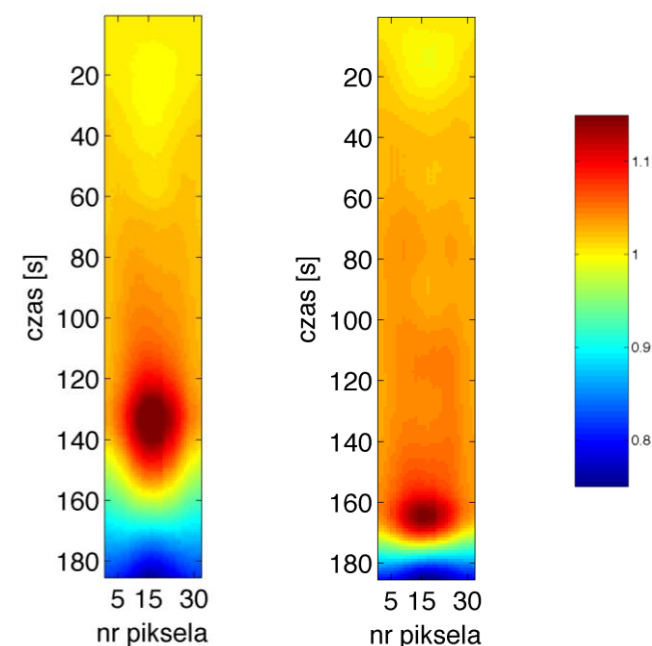


Rysunek Przykładowe zrekonstruowane obrazy metodą G-N dla chwil czasu: 20 s, 30s, 40s, 50, 60 s.

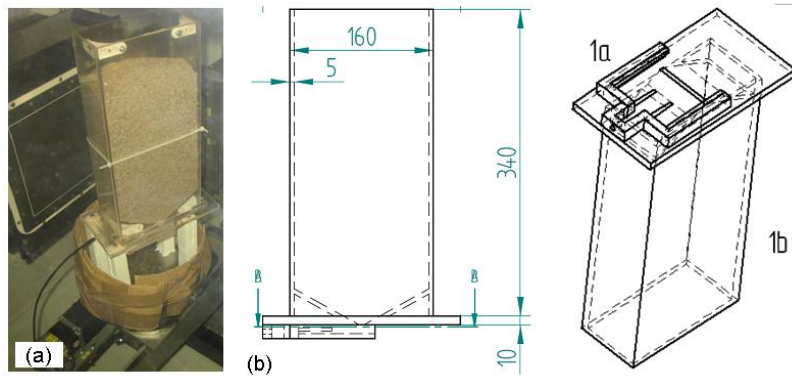
Podobnie jak to miało miejsce w poprzednich badaniach autorów projektu również dla zbiorników w dużej skali możliwe było wykrycie przy pomocy opracowanych czujników ECT wpływu szorstkości ściany na koncentrację materiału w obszarze ściany silosu. Na rysunku pokazane zostały 3 główne etapy formownia się strefy ścinania, spowodowanej obecnością papieru ściernego ulokowanego wewnątrz czujnika ECT. Dla ściany szorstkiej gęsto usypane granulat zmniejszał swą koncentrację w obszarze przyściennym poniżej wartości dla przepływu przy ścianie gładkiej. Dodatkowo zaobserwować można zwiększenie koncentracji materiału w części środkowej czujnika w stosunku do przepływu przy ścianie gładkiej. Obrazy zostały zrekonstruowane metodą LBP, aby zapobiec zmianą wartość pikseli w trakcie iteracji algorytmów nieliniowych. Mimo widocznego rozmycia granic między sterfą ścinania a resztą obszaru czujnika możliwe jest wyznaczenie parametrów ... W ramach zadania opracowano algorytm przetwarzania obrazów tomograficznych, którego ...



Zaprojektowane stanowisko przepływu grawitacyjnego pozwala również zbadać wpływ nachylenia części stożkowej na zmiany koncentracji materiału w silosie. Przeprowadzone eksperymenty na wysokości połowy silosu wykazały, że materiał opróżniany z silosu o leju, którego kąt stożka wynosi  $45^\circ$  (rys. ) powoduje, że w materiale tworzy się komin. Zaobserwować można zmniejszenie koncentracji w środku czujnika, podczas gdy obszar przy ścianie charakteryzuje się zwiększaniem koncentracji, jak to miało miejsce dla czujnika położonego na wysokości 4.05 m. Końcowa faza opróżniania (od 140 sekundy) trwa dłużej niż to ma miejsce dla stożka o kącie  $60^\circ$ . W przypadku przepływu kominowego takie efekt występował również w mniejszych modelach silosów. Dla stożka o kącie nachylenia  $60^\circ$  zjawisko przepływu kominowego występuje tylko w początkowej części przepływu (między 10 a 25 sekundą) i różnica koncentracji między obszarem centralnym a przyściennym jest zdecydowanie mniejsza niż ma to miejsce dla stożka o nachyleniu  $45^\circ$ .



Przed przystąpieniem do pomiaru przepływu grawitacyjnego w solosie kręnym – S1 wykonano pomiary w laboratorium tomografii rentgenowskiej w Laboratorium im. Henry Moseley’a (The Manchester X-Ray Imaging Facility). Przepływ grawitacyjny miał miejsce w prostokątnym modelu silosu o szerokości 16 cm i głębokości 7cm zbudowanego z Plexi (rysuenk).



Rectangular silo for funnel flow. (a) photograph of silo, (b) drawing of silo model.

Opracowany algorytm normalizacji obrazów radiograficznych oraz wyznaczenie wariancji wartości pikseli dla określonej wielkości maski pozwolił określić szerokość komina przepływu oraz zmianę koncentracji materiału w strefie stagnacji jak również (obszar przyścienny silosu). Na rysunku pokazano przykładowe obrazy dla przepływu wstępnie zagęszczonego (a) oraz luźnego (b). W przypadku przepływu kominowego dla zagęszczonego przepływu, widać wyraźną różnicę między koncentracją a w obszarze centralnym (obszar komina) oraz w strefie przyściennej, gdzie obserwujemy strefę stagnacji materiału. Do wizualizacji przepływu wstępnie zagęszczonego wystarczył sam proces normalizacji, wynikiem którego było przeskalowanie wartości pikseli radiografu do przedziału  $\langle 0,1 \rangle$ , 1 – stan początkowy, 0 – stan końcowy procesu. W przypadku przepływu luźno upakowanego różnice w koncentracji materiału w obszarze centralnym i przyściennym nie były na tyle wystraszające, aby w można było wyanczyć obszar stagnacji materiału. Wyznaczenie wartości wariancji dla określonej wielkości maski pikseli pozwolił poprawić jakość obrazu pod kątem rozróżnia strefy przepływu i stagnacji podczas rozładunku materiału (b). Obszar przepływu w części środkowej modelu silosu jest zdecydowanie szerszy niż to miało miejsce w przypadku przepływu wstępnie zagęszczonego materiału. Natomiast wysokość strefy stagnacji wzrasta podczas przepływu i jej wysokość w trakcie ustabilizowanego przepływu osiąga 0.45 wysokości części korpusu silosu.

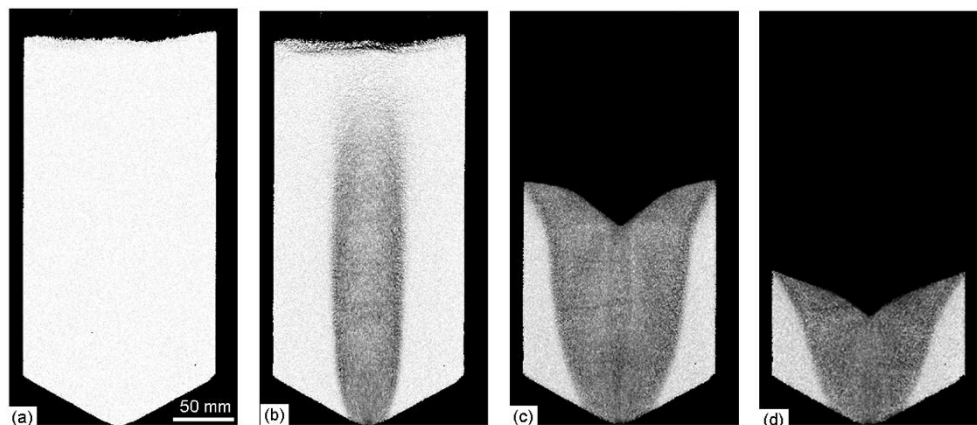


Figure 1. Normalised radiograph sequence showing silo discharging in the case of dense packing and smooth silo walls. (a-d) sequence at normalised times  $t_n=0$ ,  $t_n=0.04$ ,  $t_n=0.5$  and  $t_n=0.75$ .

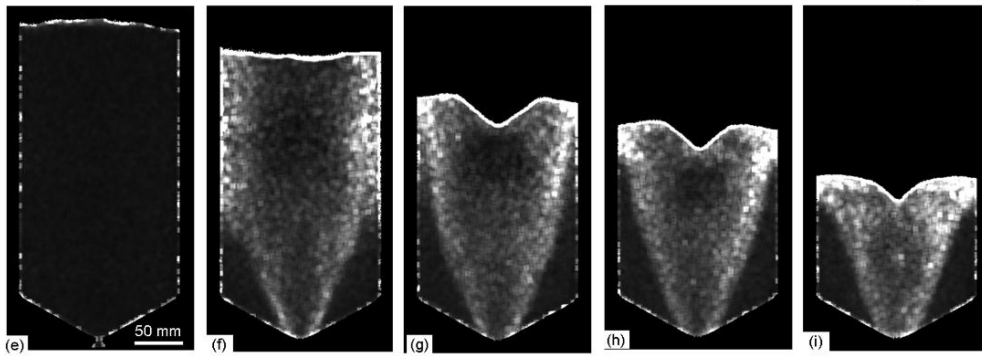
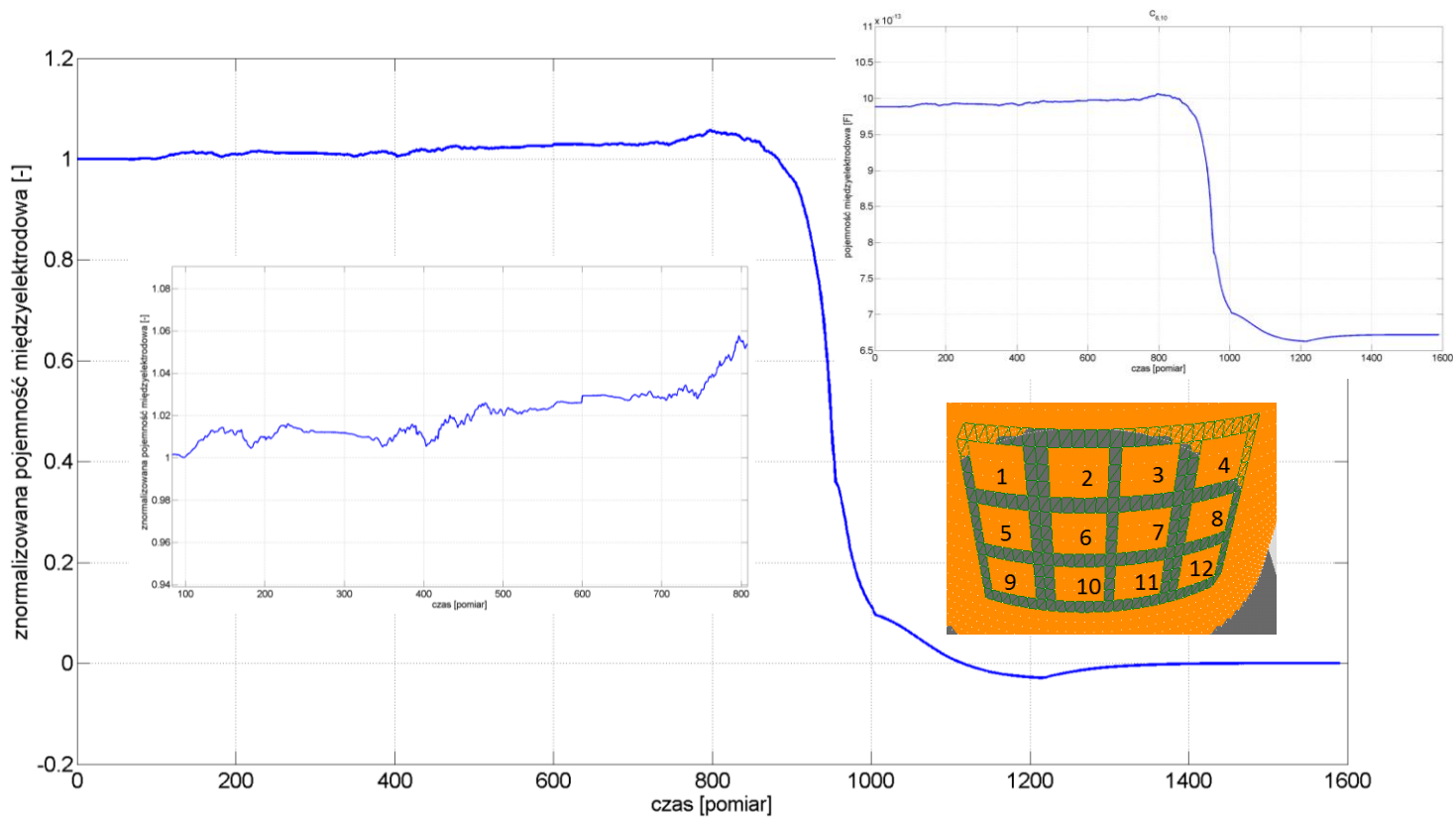
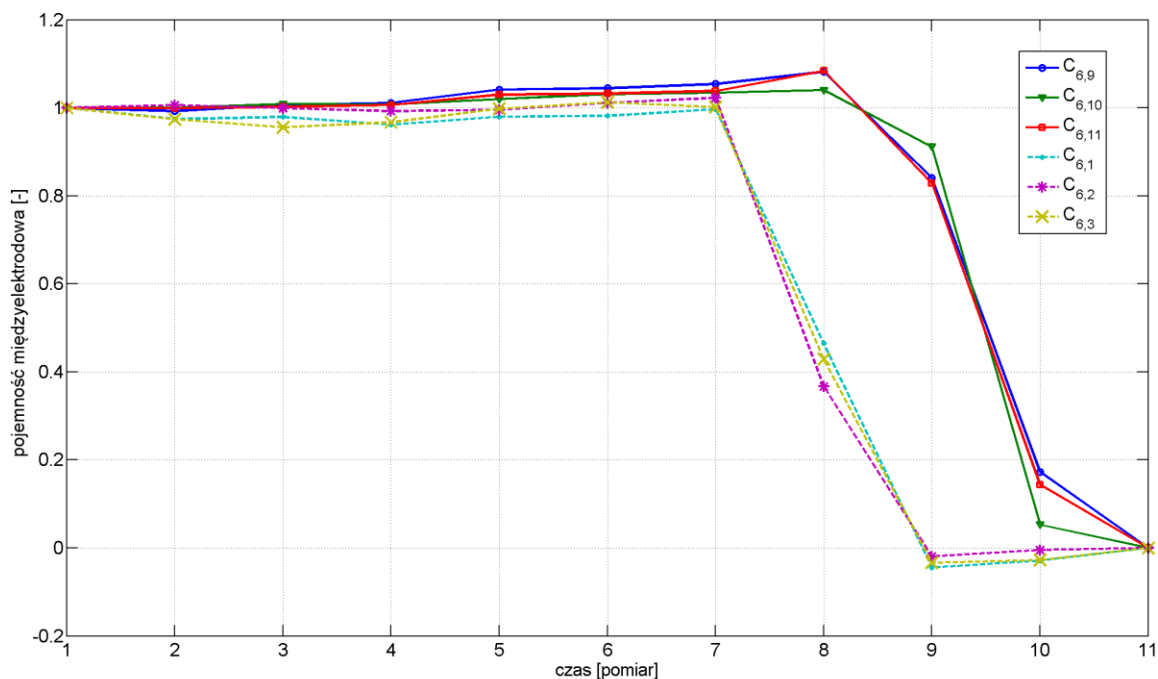


Figure 2. Radiograph sequence of silo discharging in the case of loose packing and smooth silo wall. Rescaled radiographs for (a) initial packing ( $t_n=0$ ) and (b) after  $t_n=0.04$  of discharging process. (c) subtraction (b) and its previous frame and (d) corresponding variance map, together with a scale bar. (e-i) sequence of variance maps @  $t_n=0, t_n=0.04, t_n=0.2, t_n=0.28$  and  $t_n=0.45$ . Same scale bar as in (d).

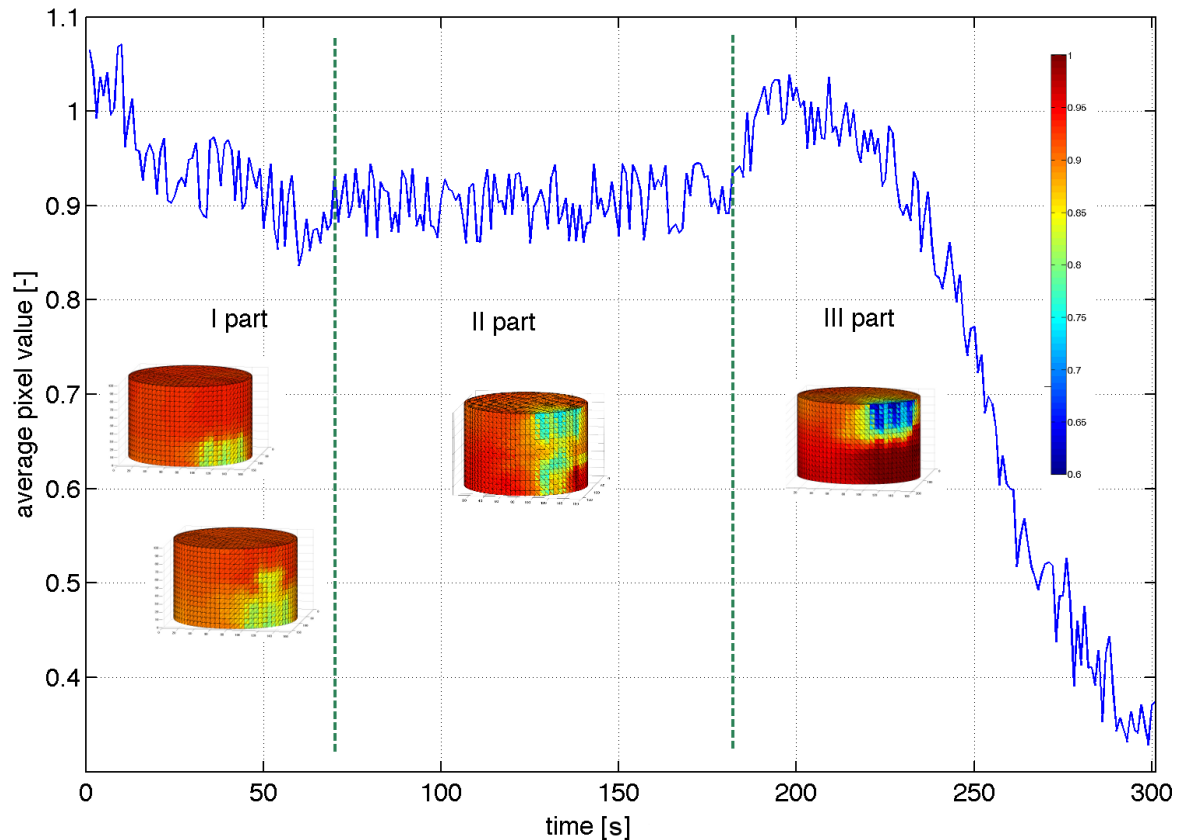
Przygotowany czujnik ECT do pomiaru przepływu grawitacyjnego w silosie krępyim został ulokowany wewnątrz silosu w taki sposób, aby dolna warstwa elektrod zawierała się w obszarze strefy stagnacji, w przypadku przepływu luźno upakowanego materiału, a pozostałe dwie warstwy ponad tym obszarem. Na rysunku poniżej przedstawiono wykres zmian pojemności elektrycznej między elektrodą 6 oraz 10 w formie danych surowych pochodzących bezpośrednio z miernika LRC oraz danych znormalizowanych. Dla tej pary elektrod widoczne jest zwiększenie wartości pomiarowej, co spowodowane jest kumulowaniem się materiału w obszarze strefy stagnacji. W celu zmierzenia rozkładu zmian koncentracji materiału w obszarze czujnika przeprowadzono również pomiary z zatrzymaniem opróżniania zbiornika. Po każdorazowym zamknięciu otworu wylotowego dokonany został pomiar pojemności międzyelektrodowej dla elektrody nadawczej nr 6 oraz elektrod odbiorczych z jej sąsiedztwa:  $\{C_{6,1}; C_{6,2}; C_{6,3}; C_{6,5}; C_{6,7}; C_{6,9}; C_{6,10}; C_{6,11}\}$ . Na kolejnym wykresie (rys...) przedstawiono wartości pomiarowe dla określonych chwil czasu. Dla przejrzystości w celu lepszej wizualizacji zmiany punkty pomiarowe połączone zostały linią prostą.



Rysunek



Analiza możliwości pomiarowych czujnika 12-elektrodowego, przedstawiona w rozdziale 2, wykazała, że część pomiarów w 66-elementowej ramce należy odrzucić ze względu na zbyt niską różnicę między sygnałami dla pustego i pełnego czujnika. Przydatność poszczególnych par elektrod została dobrana eksperymentalnie. W tym celu zbudowano ponownie macierz czułości czujnika nie uwzględniając najbardziej odległych par elektrod. Dla tego rozwiązania zrekonstruowano obraz 3D stosując w tym przypadku algorytm bezpośredniej rekonstrukcji obrazu – liniową projekcję wsteczną. Na rysunku pokazano przykładowe wyniki osiągnięte dla przepływu gęstego, kiedy stopień upakowania materiału w obszarze czujnika w stanie początkowym było wyższy niż to miało miejsce dla przepływu luźnego. rozmieszczony w objętości silosu w podobnym stopniu.



**Rysunek** Wykres zmian średniej wartości koncentracji materiału w obszarze czułości pomiarowej czujnika ECT z naniesionymi zrekonstruowanymi obrazami dla trzech głównych etapów opróżniania silosu.

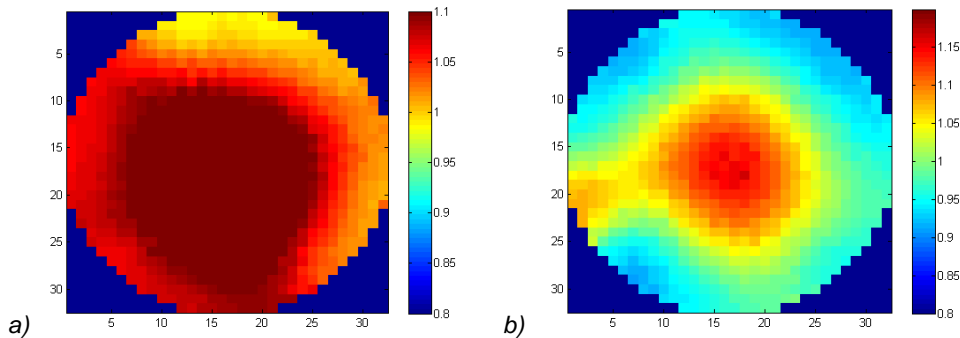
Ostatni etapem prac badawczych był pomiar przepływu materiału sypkiego w silosie. Wykonano pomiar dla różnych poziomów początkowego upakowania materiału:

- przepływu luźnego, kiedy materiał opadał grawitacyjnie ze zbiornika buforowego, tworząc stożek usypowy (rysunek)
- przepływu gęsty, kiedy materiał był nasypywany z użyciem sita.



### Wyznaczenie parametrów strefy ścinania

Analiza zrekonstruowanych obrazów tomograficznych, przedstawiających rozkład koncentracji materiału sypkiego podczas opróżniania silosu, umożliwia wyznaczenie szerokości przyściennej strefy ścinania powstającej w trakcie procesu. Zamieszczone poniżej wyniki pochodzą z opracowanego algorytmu wyznaczania parametrów strefy ścinania. Rezultaty te dotyczą dwóch rodzajów przepływów opisanych w poprzednim rozdziale – przepływ piasku luźnego dla ściany gładkiej oraz szorstkiej (przykładowe tomogramy znajdują się na rysunku 2.32).



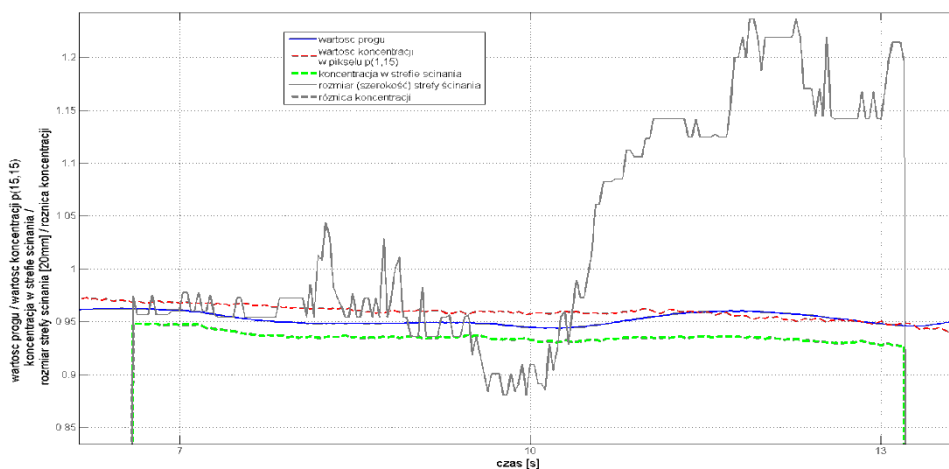
Rysunek 2.32. Wizualizacja zmian koncentracji (tomogram) piasku luźnego na wysokości  $h=1.0$  m w czasie 7 s opróżniania silosu: a) ściana gładka, b) ściana szorstka.

Algorytm wyznaczania parametrów strefy ścinania tj. wielkości zmiany koncentracji oraz jej szerokości, oparto o procedurę segmentacji zrekonstruowanego obrazu tomograficznego. W pierwszym etapie przetwarzania obrazu tomograficznego zostają wyznaczone indeksy pikseli należących do strefy ścinania według wzoru:

$$\varepsilon(i) = \begin{cases} 2, & \text{dla } \varepsilon(i) \geq (1 - 0.065 * \bar{C}) * \bar{\varepsilon} \\ \varepsilon(i), & \text{dla } \varepsilon(i) < (1 - 0.065 * \bar{C}) * \bar{\varepsilon} \end{cases} \quad i = \{1, \dots, M\} \quad (2.5)$$

gdzie  $\bar{C}$  jest średnią znormalizowanych pojemności (zastosowano normalizację modelu równoległego),  $\bar{\varepsilon}$  jest średnią znormalizowanych wartości pikseli w obrazie,  $i$  - numerem piksela,  $M$  - liczbą wszystkich pikseli w zrekonstruowanym obrazie, natomiast wartość  $\lambda=0,065$  została dobrana doświadczalnie. Znaczenie tego parametru jest istotne z punktu widzenia dokładności odwzorowania strefy ścinania na obrazach tomograficznych. Wartość jego jest funkcją zarówno szorstkości ściany, początkowego upakowania piasku oraz rozmiaru silosu. Badania nad automatycznym wyznaczeniem optymalnej wartości  $\lambda$  są dalej prowadzone.

Piksel, którego wartość spełnia warunek przedstawiony w równaniu (2,5), zostaje zakwalifikowany do obszaru strefy ścinania, a jego wartość nie ulega zmianie (rysunek 2.32b). Piksele nie należące do strefy ścinania przyjmują wartość 2. Informacja ta pozwala znaleźć granicę między obszarem strefy ścinania o resztą obszaru czujnika pomiarowego. Wyznaczenie parametrów strefy ścinania (koncentracji oraz rozmiaru) można przeprowadzić w zadanym przedziale czasu. Na rysunku 2.33 zamieszczono przebiegi zmian szukanych parametrów oraz wartości pomocniczych wyznaczonych podczas działania algorytmu. Szukane parametry wyznaczano w przedziale czasowym 6,6-13,2 s. Moment rozpoczęcia analizy to  $\approx 1,7$  s opróżniania silosu (stabilizacja przepływu) do chwili pojawienia się górnej warstwy materiału na poziomie niższego czujnika pomiarowego.



Rysunek 2.33. Wykres zmian parametrów strefy ścinania podczas przepływu grawitacyjnego materiału sypkiego.