

Robert Banasiak*, Radosław Wajman*, Zbigniew Chaniecki*,
Krzysztof Grudziń*, Andrzej Romanowski*, Jakub Betiuk*

Wizualizacja 4D ECT w czasie rzeczywistym przemysłowych procesów przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich

1. Wprowadzenie

Klasyczne zastosowania techniki tomografii pojemnościowej (*Electrical Capacitance Tomography* – ECT) opierały się na jedno- lub wielopłaszczyznowym pomiarze pojemności międzyelektrodowych. Taki pomiar umożliwiał w efekcie otrzymywanie dwuwymiarowych lub, poprzez zastosowanie techniki interpolacji, pseudotrójwymiarowych (2.5D) obrazów przekrojów badanych procesów. W artykule została zaproponowana i zastosowana technika w pełni trójwymiarowego pomiaru pojemnościowego do wizualizacji trójwymiarowej procesów w czasie rzeczywistym – 4D. Obiektem zainteresowań do badań w ramach niniejszego artykułu są procesy grawitacyjnego opróżniania silosów z materiałów sypkich. Opracowane stanowisko zostało zaopatrzone w specyficzną konstrukcję czujnika 3D ECT, dedykowaną dla potrzeb eksperymentu koncepcję pomiarową oraz aplikację realizującą wizualizację 4D badanych procesów. Efektem końcowym opracowanego systemu jest bardziej wiarygodna przestrzenna informacja o badanym procesie niż klasyczne podejście 2.5D. Z zebranych danych pomiarowych konstruowane są obrazy 3D, które stanowią sekwencję klatek wyświetlanego strumienia wideo. Przeznaczeniem stanowiska badawczego jest nieinwazyjne diagnozowanie przemysłowych procesów przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich z użyciem zaprojektowanego i budowanego w ramach projektu systemu trójwymiarowej wizualizacji przepływu. System będzie umożliwiał przestrzenną wizualizację i przetwarzanie rozkładu materiału w obszarze czujnika, również z uwzględnieniem metod dwuwymiarowych oraz analizy *raw data* w celu wyznaczania charakterystycznych parametrów opisujących dynamikę procesu opróżniania zbiorników. Opracowana metodologia pomiarowa oraz metody przetwarzania i analizy danych pomiarowych z powodzeniem będą mogły być zaadoptowane dla innych geometrii zbiorników służących do przechowywania materiałów sypkich. Tego typu zbiorniki stosowane są szeroko m.in. w przemyśle farmaceutycznym, budowlanym, chemicznym, odlewniczym, wydobywczym,

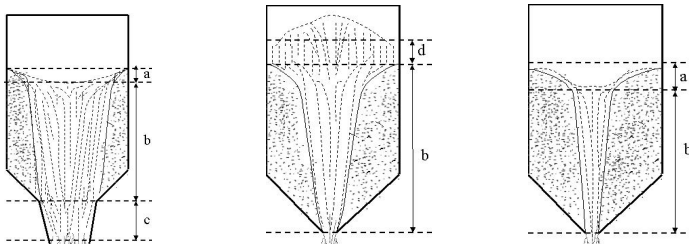
* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka

spożywczym do przechowywania i dozowania materiału w procesie produkcji. Skuteczne monitorowanie, diagnozowanie i sterowanie zjawisk zachodzących w zbiornikach pozwoli uzyskać wzrost jakości produktu oraz zwiększenie wydajności [2].

2. Grawitacyjny przepływ materiałów sypkich

Silosy to zbiorniki do przechowywania i ochrony materiałów stałych; zwykle są to proszki, granulaty, ziarna i inne. Zbiorniki te wykorzystywane są szeroko w przemyśle chemicznym, budowlanym, spożywczym i przetwórczym oraz we wszelkiego rodzaju mniejszych instalacjach do przechowywania i transportu materiałów stałych.

W trakcie rozładowywania zbiorników mogą pojawić się różne reżimy przepływu materiałów stałych. Dwa najważniejsze to tzw. przepływ masowy i przepływ kominowy [2]. Przepływ masowy charakteryzuje się tym, że całość materiału znajdująca się w płaszczyźnie poprzecznej zbiornika porusza się w kierunku otworu jednocześnie z taką samą prędkością. Czasami pojawia się sytuacja, w której w centrum przekroju poprzecznego silosu materiał porusza się szybciej niż przy ścianach tworząc tzw. komin, w obrębie którego materiał płynie swobodnie natomiast materiał zgromadzony przy ścianach może nawet przestać się w ogóle poruszać tworząc tzw. region stagnacji lub martwą strefę (rys. 1).



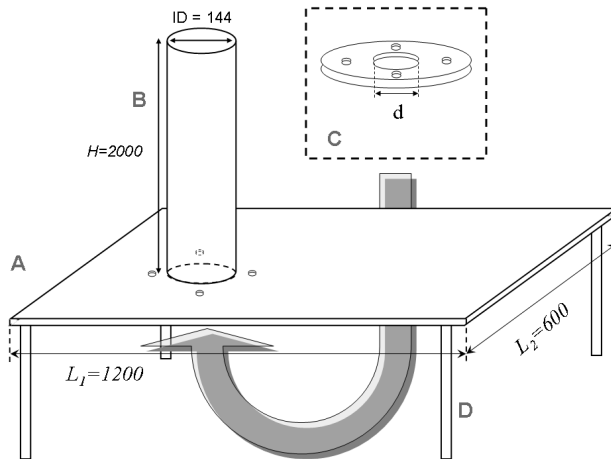
Rys. 1. Reżimy przepływu występujące podczas opróżniania hopera z materiałów sypkich (a – przepływ spoczynkowy; b – przepływ kominowy; c – przepływ masowy; d – przepływ złożowy)

W zastosowaniach przemysłowych najczęściej pożądaną opcją jest przepływ masowy w celu uzyskania stabilnych warunków opróżniania i utylizacji całej kubatury zbiornika. W konsekwencji silosy powinny być tak zaprojektowane, aby dawały się łatwo rozładować. Jednakże w trakcie ich pracy pojawia się wiele problemów, takich jak m.in. za mała prędkość opróżniania, niekompletne opróżnianie, blokowanie przepływu. Istnieje cały szereg czynników powodujących występowanie niepożądanych zjawisk. Mogą to być m.in. właściwości składowanych materiałów (tarcie, porowatość, gęstość upakowania, itp.), geometria zbiornika, rodzaj materiału, z jakiego został wykonany (wsp. tarcia ścian).

3. Konstrukcja stanowiska badawczego

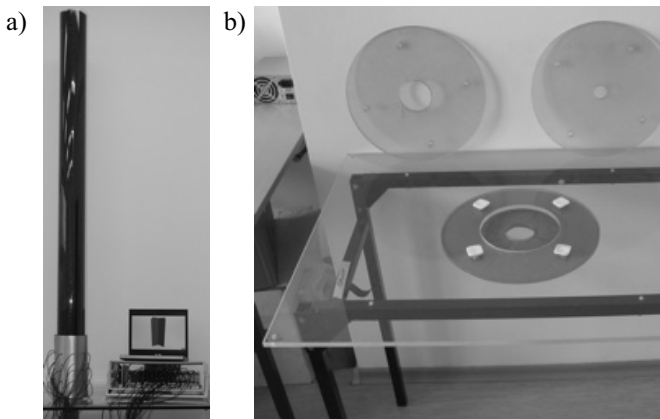
Zbudowane stanowisko laboratoryjne, przedstawione schematycznie na rysunku 2, składa się z: A – blatu wykonanego z płyty z pleksi o wymiarach 1200×600×10 mm (za-

znaczono otwory do mocowania wymiennych płyt z otworami wylotowymi); **B** – rury z pleksi o średnicy zewnętrznej 144 mm i grubości ścianek 3 mm; **C** – zestawu otworów wylotowych o średnicach $d = 30, 50, 90$ mm, wytoczonych w wymiennych pleksiglasowych płytach, mocowanych od spodu blatu stanowiska; **D** – stelażu – konstrukcja wsporcza stanowiska.



Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego
Objaśnienia w tekście

Na rysunku 3 znajduje się zdjęcie stanowiska z zamontowanym czujnikiem podłączonym do tomografu pojemnościowego i komputera.

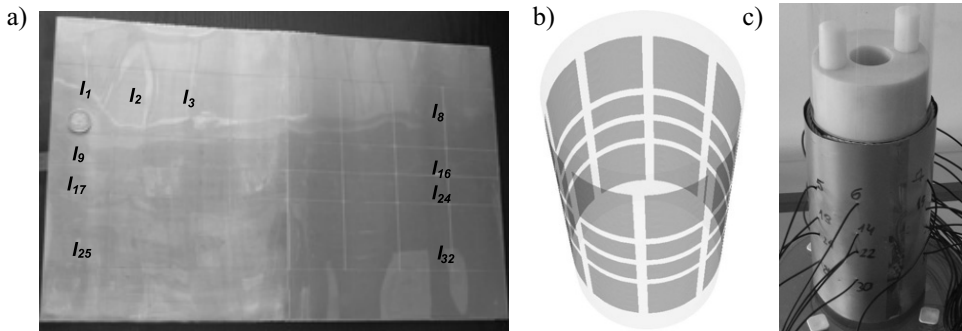


Rys. 3. Fotografia stanowiska pomiarowego: a) zbiornik zapełniony granulatem HDPE wraz z czujnikiem pojemnościowym z podłączonym tomografem i komputerem z oprogramowaniem do wizualizacji rozkładu materiału wewnątrz obszaru pomiarowego; b) wymienne płyty z różnymi średnicami otworów wylotowych

4. System pomiarowy

4.1. Trójwymiarowy pomiar ECT

Dla potrzeb tak przygotowanego stanowiska badawczego został wykonany czujnik pojemnościowy, składający się z $L = 32$ elektrod, otaczających zbiornik. Czujnik został wykonany w laboratorium Katedry Informatyki Stosowanej PŁ. Rozmieszczenie i kształt elektrod czujnika zostały pokazane na rysunku 4. Fotografia została wykonana jeszcze przed zamontowaniem czujnika na zbiorniku. Elektrody są rozmieszczone w 4 płaszczyznach po 8 elektrod na każdej. Wysokość zewnętrznych pierścieni elektrod wynosi 70 mm, natomiast wewnętrznych 30 mm.



Rys. 4. Miedziany czujnik pojemnościowy 32-elektrodowy (w konfiguracji 4×8):
 a) widok rozłożonego arkusza miedzianego z wytrawionymi elektrodami;
 b) wizualizacja czujnika; c) podłączony i zamontowany czujnik pomiarowy

Protokół pomiarowy zastosowany w stanowisku badawczym nawiązuje do tego, wykorzystywanego w klasycznej tomografii pojemnościowej przekroju poprzecznego. Na początku wybierana jest pierwsza elektroda i podawany jest na niej potencjał dodatni, podczas gdy pozostałe elektrody są uziemione – dokonywany jest pomiar. W dalszej kolejności sukcesywnie wybierana jest kolejna elektroda jako nadawcza. W efekcie tego możliwe jest zebranie

$$M = n(n-1)/2 \quad (1)$$

niezależnych pomiarów dla n -elektrodowego czujnika. W odróżnieniu od tomografii 2D w tym przypadku (3D) pomiary wykonywane są również pomiędzy elektrodami z różnych warstw.

4.2. Trójwymiarowa konstrukcja obrazów

Na proces trójwymiarowej konstrukcji obrazów składają się dwa zagadnienia: proste i złożone [3, 5, 6, 7]. Zagadnienie proste jest zasadniczo trójwymiarowym modelowaniem

poła elektrycznego [4]. Dla potrzeb prac w czasie rzeczywistym może on być wykonany raz przed właściwym przetwarzaniem. Celem jego jest wyznaczeniem tzw. macierzy wrażliwości zastosowanego czujnika 3D ECT. Wrażliwość określonego punktu przestrzeni czujnika ECT definiowana jest jako zmiana pomierzonej pojemności powstała w wyniku zmiany wartości przenikalności (materiału) w danym punkcie. W deterministycznych algorytmach konstrukcji obrazów macierz wrażliwości jest elementem wprowadzającym linearyzację zagadnienia. Macierz ta nie jest kwadratowa. Jej wymiary zależą od liczby pomiarów i od poziomu dyskretyzacji przestrzeni pomiarowej (liczba elementów trójwymiarowego obrazu – woksele).

W wyniku zastosowania macierzy wrażliwości zagadnienie odwrotne upraszcza się do postaci:

$$\hat{\mathbf{e}} = \mathbf{S}^+ \cdot \mathbf{C} \quad (2)$$

gdzie $\hat{\mathbf{e}}$ jest wektorem kolumnowym, którego elementy to wartości poszczególnych wokseli skonstruowanego obrazu (podobnie jak w przypadku obrazu 2D wartości elementów obrazu – piksele/woksele – stanowią względną wartość przenikalności dielektrycznej), \mathbf{C} jest wektorem kolumnowym z wartościami pomiarowymi oraz \mathbf{S}^+ jest pseudoodwrotnością macierzy wrażliwości. Zadanie odwrotne dla tomografii pojemnościowej jest podokreślone z uwagi na znacznie większą liczbę niewiadomych (wokseli obrazów) niż znanych wartości pomiarowych.

W literaturze światowej można spotkać wiele deterministycznych algorytmów realizujących proces konstrukcji obrazów dla ECT [1, 5]. Najbardziej znana to liniowa projekcja wsteczna (*Linear Back-Projection* – LBP). Metoda ta aproksymuje pseudoodwrotność macierzy wrażliwości jej transpozycją. Metoda jest szeroko stosowana z uwagi na jej szybkość działania. Niestety odbywa się to kosztem jakości końcowych obrazów. Z kolei metoda ta może być stosowana w schemacie iteracyjnym. Rozwiązanie takie, zwane iteracjami Landwebera, przynosi znaczący zysk w jakości końcowych wyników przy jednoczesnym zachowaniu możliwości zastosowania tej metody do pracy w czasie rzeczywistym. Proces konstrukcji obrazów przeprowadzany jest wtedy zgodnie z równaniem:

$$\hat{\mathbf{e}}_{k+1} = \hat{\mathbf{e}}_k - \alpha \mathbf{S}^T (\mathbf{S} \hat{\mathbf{e}}_k - \mathbf{C}) \quad (3)$$

gdzie k wyznacza numer iteracji, a α jest parametrem relaksacji stosowanym w celu kontroli zbieżności procesu konstrukcji obrazów.

4.3. Wizualizacja 4D

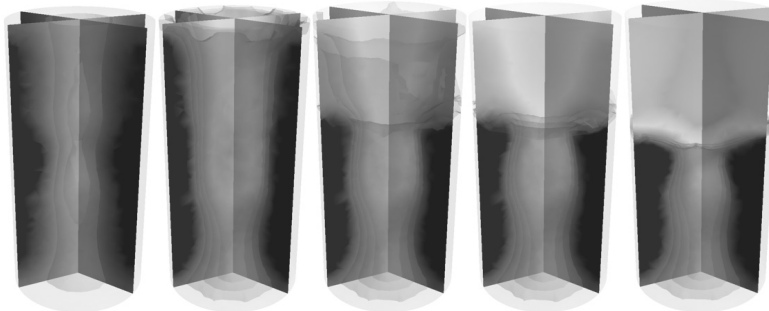
Ważnym etapem w procesie konstrukcji trójwymiarowych tomogramów jest ich prezentacja w czytelnej formie trójwymiarowego obrazu. Proces prezentacji takich obrazów jest etapem równie wymagającym, co sama konstrukcja obrazów. Dla potrzeb badań wykorzystane zostały najnowsze technologie stosowane w akceleratorach graficznych (GPU)

oraz efektywny interfejs programistyczny Visualization ToolKit (VTK) dystrybuowany na zasadzie licencji otwartych źródeł OpenSource. Wspomniana biblioteka VTK dostarcza zaawansowanych mechanizmów prezentacji grafiki trójwymiarowej, m.in. nakładanie izopowierzchni z możliwością ustawiania różnego stopnia przezroczystości, definiowanie złożonych przekrojów poprzecznych.

5. Wyniki badań

W ramach badań związanych ze stanowiskiem silosów zaimplementowano algorytmy do trójwymiarowej konstrukcji obrazów tomograficznych w czasie rzeczywistym.

Przeprowadzony został eksperyment opróżniania zbiornika. Dla zebranych danych pomiarowych pochodzących z $M = 496$ wartości pojemności międzyelektrodowych (odpowiadających jednej ramce strumienia wideo) przeprowadzony został proces konstrukcji trójwymiarowych obrazów za pomocą zbudowanego czujnika 32-elektrodowego. Na rysunku 5 przedstawione zostały wybrane klatki zrealizowanego filmu z przebiegu eksperymentu. Widoczne jest charakterystyczne zjawisko powstawania komina przepływu podczas rozładowywania zbiornika.



Rys. 5. Rezultaty konstrukcji i wizualizacji obrazów trójmiarowych rozładowywania zbiornika z materiałem sypkim

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiony został system trójwymiarowego tomografu pojemnościowego wspomaganego aplikacją realizującą trójwymiarową wizualizację badanych procesów w czasie rzeczywistym. Warto zauważyć, że zastosowana do badań technika konstrukcji obrazów nastawiona była raczej na szybkość przetwarzania niż na jakość uzyskiwanych wyników. W przypadku zastosowania nieliniowych algorytmów konstrukcji obrazów [5] z pewnością spodziewany by był znaczący wzrost jakości wizualizacji. Jednak wykorzystywany tam mechanizm, który polega na kilkukrotnym rozwiązaniu zagadnienia prostego

(modelowanie FEM) w celu zaktualizowania macierzy wrażliwości w oparciu o częściowo skonstruowany obraz w poprzedniej iteracji, jest dość czasochłonny i przy obecnym stanie techniki komputerowej stosowalność tej metody w aplikacjach czasu rzeczywistego 4D jest bardzo ograniczona. Z kolei analizując zaprezentowane w artykule wyniki, można stwierdzić, że zaproponowany system pomiarowy może dawać satysfakcjonujące rezultaty w zależności od jego zastosowania w warunkach przemysłowych. W przypadku wizualizacji przepływów grawitacyjnych materiałów sypkich widoczne są wszystkie charakterystyczne etapy i struktury przepływu. Wykryte zostały różnice w upakowaniu materiału pomiędzy obszarem komina a regionem przy ściankach. To potwierdza możliwość badania zjawisk fluktuacji materiału zachodzących wewnątrz zbiorników.

Podziękowania

Badania są współfinansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego RP w ramach międzynarodowego projektu badawczego (167/6, PR UE/2007/7).

Literatura

- [1] Adler A., Dai T., Lionheart WR.B., *Temporal Image Reconstruction in Electrical Impedance Tomography*. *Physiol. Meas.*, 2007, 28:S1–S11.
- [2] Bates L., *Problems in Particulate Flow, Part A — Flow Regimes*. By Ajax Equipment Ltd. Mule Street, Bolton BL2 2AR, United Kingdom, <http://www.erpt.org/992Q/bate-00.htm>, 1999.
- [3] Banasiak R., Mazurkiewicz L., Wajman R., *3D graphics hardware acceleration features for 3D tomography*. 3rd Int. Symp. on Process Tomography, Lodz, 2004, 19–23.
- [4] Loser T., Wajman R., Mewes D., *Electrical capacitance tomography: image reconstruction along electrical field lines*. *Meas. Sci. Technol.*, vol. 12, nr 8, 2001, 1083–1091.
- [5] Wajman R., Banasiak R., Mazurkiewicz Ł., Banasiak R., Dyakowski T., Sankowski D., *Spatial imaging with 3D capacitance measurements*. *Measurement Science and Technology*, 17, 8, 2006, 2113–2118.
- [6] Warsito W., Fan L.S., *Development of three-dimensional electrical capacitance tomography*. Proc. 3rd World Congress on Industrial Process Tomography, Banff, 2003.
- [7] York T., Mazurkiewicz L., Polydorides N., Mann R., Grieve B., *Image reconstruction for pressure filtration using EIDORS 3D*. 3rd World Congress on Industrial Process Tomography, Banff, 2003, 559–64.