

Krzysztof Grudziń*, Maciej Niedostatkiwicz**, Zbigniew Chaniecki*

Diagnostyka przepływu materiału sypkiego podczas grawitacyjnego opróżniania silosu smukłego

1. Wprowadzenie

Eksplatacja silosów, w których składowane są materiały sypkie, jest zagadnieniem skomplikowanym z uwagi na rozdrobniony charakter materiału sypkiego i wynikającą stąd możliwość niesymetrycznego obciążenia ścian, jak również dna silosów, zarówno w fazie napełniania, jak i w czasie opróżniania silosów [1, 2]. Do zjawisk, które wywołują największe problemy związane z użytkowaniem silosów należą: powstawanie stref lokalizacji w materiałach sypkich, problem zwiększenia naporu w miejscu zmiany geometrii silosu (przejścia części równoległej w lej), zagadnienie wybożenia ścian oraz efekty dynamiczne [3]. Efekty dynamiczne są w praktyce nieodłącznym elementem każdego procesu opróżniania silosu. W materiałach bezkohezyjnych występują one w postaci pulsacji, w materiałach kohezyjnych w postaci pulsacji i uderzeń [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

Silne efekty dynamiczne powstają jako wynik dynamicznej interakcji pomiędzy drgającym, wypływającym z silosu materiałem sypkim a konstrukcją silosową [11, 12, 13]. Wzrost smukłości silosu zwiększa prawdopodobieństwa wystąpienia silnych efektów dynamicznych [3]. W wyniku rezonansu zwiększa się napór na ściany i dno silosu, co może doprowadzić do stanu przedawaryjnego, awarii a nawet katastrofy budowlanej.

Jedną z najbardziej efektywnych metod redukcji efektów dynamicznych jest metoda podwyższenia szorstkości ścian silosu, w skali przemysłowej polegająca na montażu na wewnętrznej stronie poboczniczy silosu blach ryflowanych [6]. W wyniku zwiększenia szorstkości ścian, w przepływającym materiale sypkim w wyniku ścinania przy ścianie powstają dodatkowe poprzeczne sprężyste fale naprężeniowe które podwyższają częstotliwość drgań materiału sypkiego i powodują odsunięcie się od częstotliwości drgań konstrukcji silosowej, a tym samym omińnięcie obszaru rezonansu [3, 13]. Zwiększenie szorstkości ścian nie zmienia charakteru przepływu materiału sypkiego – w górnej części silosu zachowany zostaje przepływ masowy.

* Politechnika Łódzka

** Politechnika Gdańska

Celem artykułu jest przedstawienie możliwości zastosowania metody elektrycznej tomografii pojemnościowej (ECT – *Electrical Capacitance Tomography*) do diagnostyki parametrów przepływu materiału sypkiego w smukłym silosie ze ścianami gładkimi, jak również szorstkimi. Nie jest to pierwsza praca dotycząca pomiaru przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich za pomocą metody ECT [14, 15, 16, 17]. Jednakże do tej pory prace w większości przypadków podejmowały problem monitorowania stanu procesu zarówno napełniania, jak i opróżniania zbiorników, ze szczególnym uwzględnieniem rdzenia przepływu. W niniejszym artykule szczególny nacisk położono na możliwości detekcji wpływu ścian szorstkich na zachowanie się materiału sypkiego podczas opróżniania silosu, ze względu na tworzenie się lokalizacji w postaci przyściennej strefy ścinania.

2. Stanowisko badawcze

Doświadczenia przeprowadzono z zastosowaniem cylindrycznego modelu silosu wykonanego z PMM (polimetakrylan metylu) (średnica $d = 0,2$ m, wysokość $h = 2,0$ m, grubość ścian $t = 0,005$ m). Silos wypełniony był bezkohezyjnym piaskiem średnioziarnistym ze średnią średnicą ziarna $d_{50} = 0,8$ mm. Zbiornik posadowiony był na stalowej konstrukcji wsporczej, górna krawędź silosu była swobodna. Silos wypełniony był piaskiem w stanie luźnym (*volumetric weight* $\gamma = 15,0$ kN/m³, wskaźnik porowatości $e_0 = 0,76$) oraz zagęszczonym ($\gamma = 16,5$ kN/m³, $e_0 = 0,61$). W przypadku materiału w stanie luźnym silos napełniany był poprzez lej umieszczony w jego górnej części, w przypadku materiału w stanie zagęszczonym – napełniany był tzw. metodą „deszczu rozproszonego” – przez sito o oczkach $0,6 \times 0,6$ cm umieszczone nad górną częścią silosu. Doświadczenia przeprowadzone zostały dla przypadku wypływu grawitacyjnego (średnica otworu wylotowego wynosiła $d_0 = 0,07$ m) zarówno dla ścian gładkich ($r_w \ll d_{50}$, r_w – szorstkość ścian), jak i dla ścian szorstkich ($r_w \approx d_{50}$). Podwyższenie szorstkości ścian uzyskano poprzez przyklejenie do wewnętrznej strony pobocznic silosu papieru ściernego. Papier ścierny przymocowany został na całej wysokości silosu. W czasie przepływu masowego, gdy materiał sypki przemieszczał się na odcinku od 2,0 do 0,85 m w czasie opróżniania silosu występowały silne efekty dynamiczne pochodzenia rezonansowego, znane również pod nazwą „muzyki silosowej” [3, 11, 13]. Efekty te występowały od chwili rozpoczęcia opróżniania silosu i zanikały w chwili przejścia przepływu masowego w kominowy.

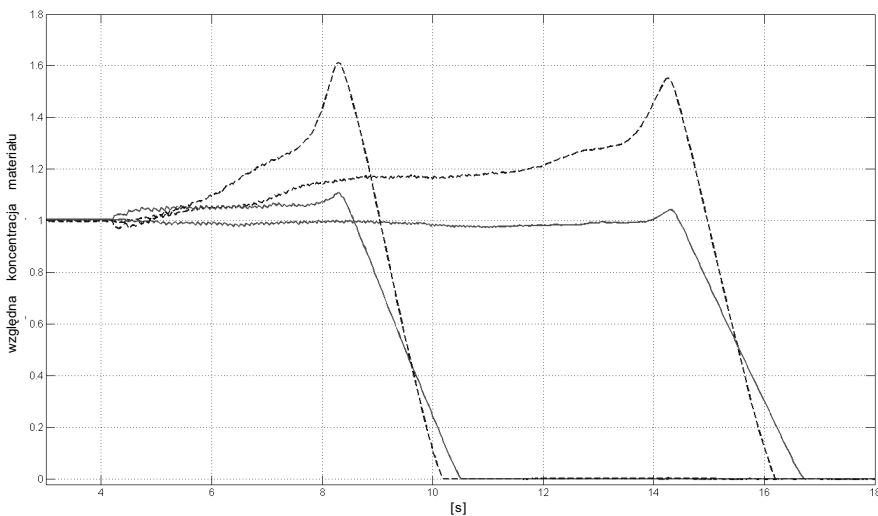
3. Elektryczna tomografia pojemnościowa (ECT)

Do pomiarów rozkładu koncentracji materiału w kolejnych chwilach czasu użyto elektrycznej tomografii pojemnościowej [18, 21]. Jej zadaniem było wizualizowanie dystrybucji koncentracji materiału w obszarze pomiarowym czujnika. Zastosowany tomograf umożliwił dokonania pomiarów za pomocą dwóch odseparowanych 12-elektrodowych czujników. Rejestracja danych pomiarowych odbywała się z prędkością 30 ramek/s na każdą z płaszczyzn czujnika (poprzez ramkę określa się zbiór n pomiarów C_n^t pojemności przypadających na jeden cykl pomiaru – t , które stanowią podstawę do rekonstrukcji obrazu tomograficznego).

W celu zapewnienia odpowiedniego poziomu stosunku sygnału do szumu (*Signal to Noise Ratio* – SNR) długość, umiejscowionych na zewnątrz, elektrod równa była średnicy silosu. Zrekonstruowany obraz tomograficzny przedstawiał rozkład materiału w obszarze czujnika pomiarowego w postaci obrazów 2D o rozmiarze 32×32 piksele [19, 20]. W przypadku mieszanki dwóch materiałów dielektrycznych wartość każdego piksela oznacza względną zawartość materiału o wyższej wartości przenikalności dielektrycznej (materiał sypki), w stosunku do materiału o niższej wartości przenikalności dielektrycznej (powietrze). Jakość obrazu tomograficznego uwarunkowana jest m.in. od liczby niezależnych pomiarów przypadających na jeden zrekonstruowany obraz. W przypadku tomografii pojemnościowej są to międzyelektrodowe pojemności pomiędzy każdą kombinacją par elektrod czujnika. W prowadzonych pracach liczba pomiarów n (stanowiąca jedną ramkę pomiarową) wynosiła 66.

4. Wyniki badań

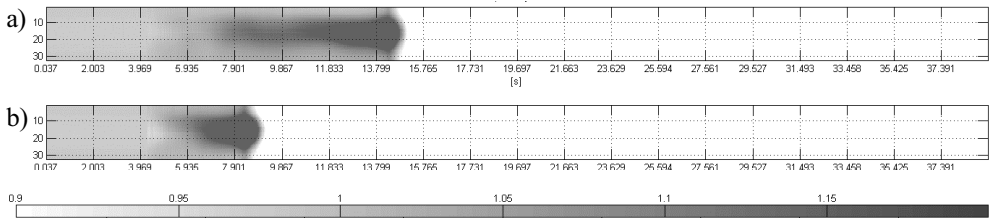
Doświadczenia przeprowadzono dla przypadku usytuowania elektrod pomiarowych na wysokościach $h = 0,3, 0,75, 0,85, 1,0$ oraz $1,5$ m licząc od płaskodennego dna silosu. W artykule przedstawiono wyniki jedynie dla przypadku jednoczesnego pomiaru czujnikami usytuowanymi na wysokości $h = 1,0$ m i $h = 1,5$ m.



Rys. 1. Zmiany koncentracji piasku luźnego w przypadku ściany gładkiej dla piksela zlokalizowanego: przy ścianie (p(1, 15)) – linia ciągła; w środku przekroju poprzecznego (p(15, 15)) – linia przerywana (krótsze charakterystyki przedstawiają zmiany koncentracji dla wysokości $h = 1,5$ m, dłuższe dla $h = 1,0$ m)

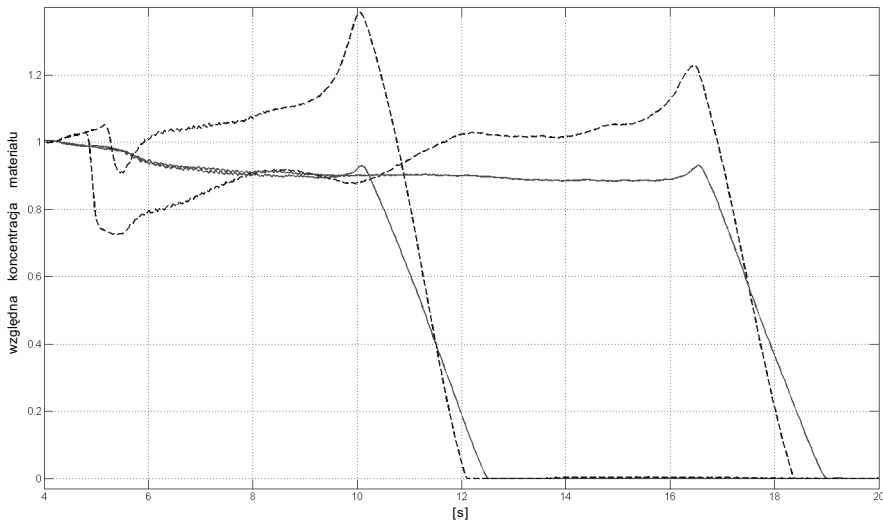
Dla piasku luźnego i ścian gładkich podczas opróżniania silosu materiał sypki ulegał sukcesywnej kontraktancji (wzrost koncentracji) (rys. 1 oraz 2). W przekroju poprzecznym (dla piksela p(15, 15)) na wysokości $h = 1,0$ m oraz $h = 1,5$ m w chwili, gdy materiał sypki zbliżał

się do górnej krawędzi elektrody pomiarowej wzrost koncentracji dochodził do $\approx 20\text{--}25\%$ wartości stanu początkowego (pojawiający się maksimum koncentracji dochodzące nawet do $50\text{--}60\%$ związany jest z błędem pomiaru, kiedy górna warstwa materiału zaczynała przechodzić przez przestrzeń czujnika pomiarowego). W przekroju przyściennym (dla piksela $p(1, 15)$) na poziomie $h = 1,0$ m wzrost koncentracji był pomijalny, natomiast na poziomie $h = 1,5$ miał miejsce wzrost do $\approx 8\%$ wartości stanu początkowego. Na poziomie $h = 1,5$ m materiał sypki, zarówno w strefie przyściennej, jak również w przekroju poprzecznym wykazywał dynamiczne pulsacje w czasie opróżniania silosu.



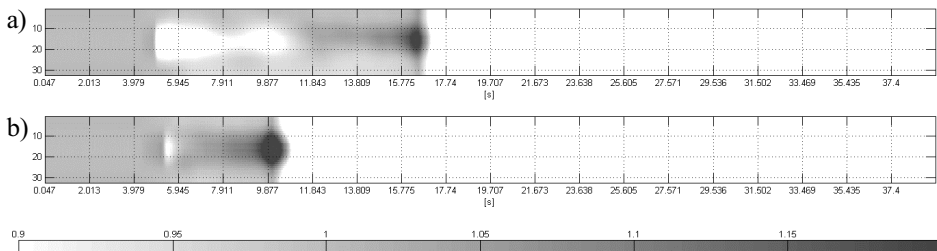
Rys. 2. Wizualizacja zmian koncentracji (topogram) piasku luźnego (ściana gładka) na wysokościach: a) $h = 1,0$ m; b) $h = 1,5$ m

Dla piasku zagęszczonego i ścian gładkich podczas opróżniania silosu materiał sypki ulegał zarówno kontraktacji, jak też dylatacji (spadek koncentracji) (rys. 3 oraz 4).



Rys. 3. Zmiany koncentracji piasku zagęszczonego w przypadku ściany gładkiej dla piksela zlokalizowanego: przy ścianie ($p(1, 15)$) – linia ciągła; w środku przekroju poprzecznego ($p(15, 15)$) – linia przerywana (krótsze charakterystyki przedstawiają zmiany koncentracji dla wysokości $h = 1,5$ m, dłuższe dla $h = 1,0$ m)

W przekroju poprzecznym (dla piksela $p(15, 15)$) na wysokości $h = 1,0$ m w chwili rozpoczęcia opróżniania silosu materiał uległ kontraktacji $\approx 3\%$ wartości stanu początkowego, a następnie gwałtownej dylatacji $\approx 25\%$ wartości stanu początkowego. Następnie miał miejsce sukcesywny wzrost kontraktacji. W chwili gdy materiał sypki zbliżał się do górnej krawędzi elektrody pomiarowej, wzrost koncentracji dochodził do $\approx 10\%$ wartości stanu początkowego. Na poziomie $h = 1,5$ m materiał (dla lokalizacji piksela $p(15, 15)$) zachowywał się podobnie, początkowo uległ kontraktacji $\approx 3\%$ wartości stanu początkowego, później dylatacji $\approx 10\%$. W chwili gdy materiał sypki zbliżał się do górnej krawędzi elektrody pomiarowej, wzrost koncentracji osiągnął do $\approx 15\%$ wartości stanu początkowego. W przekroju przyściennym (dla piksela $p(1, 15)$) od chwili rozpoczęcia opróżniania silosu miał miejsce sukcesywny spadek koncentracji materiału. Na poziomie $h = 1,0$ m oraz $h = 1,5$ m dylatacja materiału osiągnęła $\approx 10\%$ wartości stanu początkowego. Podobnie jak w przypadku materiału w stanie luźnym, również dla przypadku materiału w stanie zagęszczonym na poziomie $h = 1,5$ m występowały dynamiczne pulsacje w czasie opróżniania silosu. Wyznaczone za pomocą metody ECT wielkości amplitud pulsacji dla przypadku piasku luźnego i zagęszczonego były zbliżone.

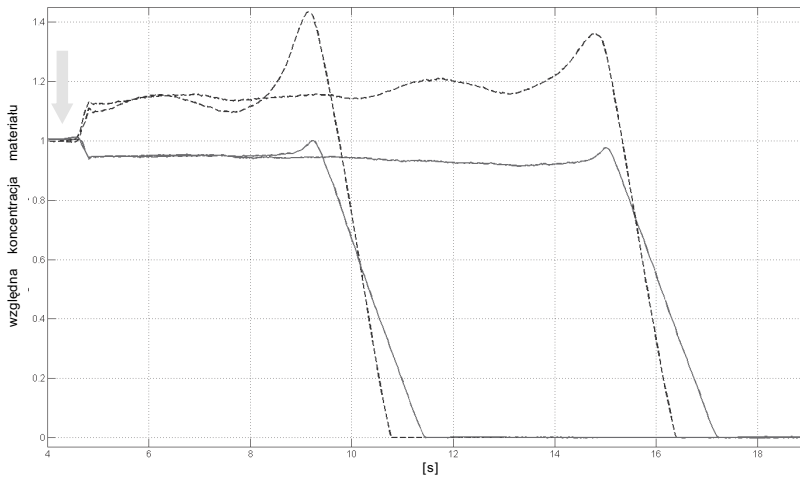


Rys. 4. Wizualizacja zmian koncentracji (topogram) piasku zagęszczonego (ściana gładka) na wysokościach: a) $h = 1,0$ m; b) $h = 1,5$ m

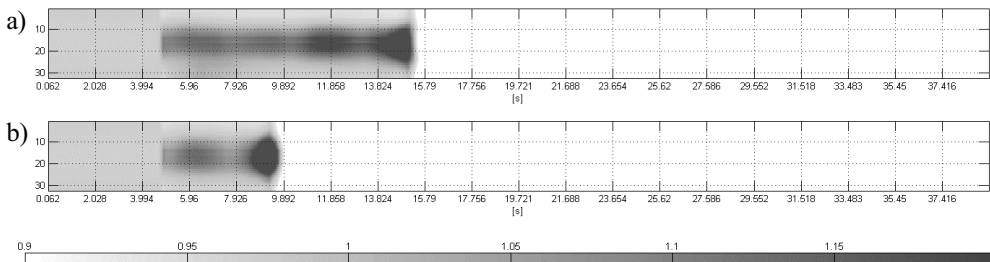
Dla piasku zagęszczonego i ścian szorstkich podczas opróżniania silosu materiał sypki ulegał kontraktacji w przekroju poprzecznym (piksel $p(15, 15)$) oraz dylatacji w strefie przyściennej (piksel $p(1, 15)$), (rys. 5 oraz 6). W przekroju poprzecznym na wysokości $h = 1,0$ m oraz $h = 1,5$ m w chwili rozpoczęcia opróżniania silosu nastąpił wzrost koncentracji materiału do $\approx 12\%$ wartości stanu początkowego, a następnie miał miejsce dalszy sukcesywny wzrost kontraktacji. W chwili gdy materiał sypki zbliżał się do górnej krawędzi elektrod pomiarowych, wzrost koncentracji dochodził do $\approx 20\%$ wartości stanu początkowego. W przekroju przyściennym na wysokości $h = 1,0$ m oraz $h = 1,5$ m w chwili rozpoczęcia opróżniania silosu miał miejsce krótkotrwały wzrost koncentracji materiału sypkiego do $\approx 3\%$ wartości stanu początkowego, a następnie jej spadek. Chwilowy wzrost koncentracji materiału sypkiego świadczy o tzw. zawieszeniu się materiału na szorstkiej ścianie silosu (krótkotrwały wzrost oznaczono na rys. 5 strzałką \Downarrow). Dylatacja na poziomie $h = 1,0$ m oraz $h = 1,5$ m osiągnęła $\approx 8\%$ wartości stanu początkowego w chwili, gdy materiał sypki zbliżał się do górnej krawędzi elektrod pomiarowych. Szerokość strefy ścinania wzdłuż ścian silosu miała szerokość ≈ 20 mm.

Dla piasku zagęszczonego i ścian szorstkich podczas opróżniania silosu materiał sypki ulegał dylatacji w przekroju poprzecznym (piksel $p(15, 15)$), jak również w strefie przyściennej (piksel $p(1, 15)$), (rys. 7 oraz 8).

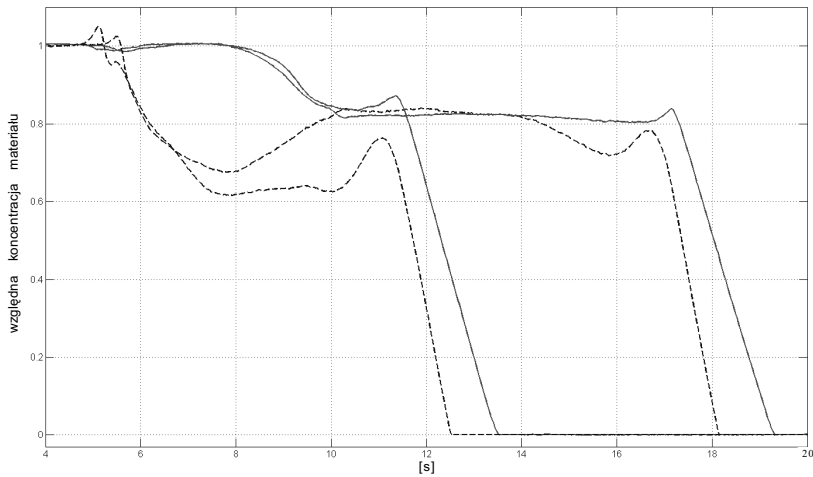
W przekroju poprzecznym na wysokości $h = 1,0$ m oraz $h = 1,5$ m w chwili rozpoczęcia opróżniania silosu nastąpił krótkotrwały wzrost koncentracji materiału do $\approx 4\%$ wartości stanu początkowego. Występująca w następnej fazie opróżniania silosu dylatacja materiału sypkiego wynosiła odpowiednio $\approx 30\%$ na wysokości $h = 1,0$ m oraz $\approx 35\%$ na wysokości $h = 1,5$ m. W przekroju przyściennym na wysokości $h = 1,0$ m oraz $h = 1,5$ m w chwili rozpoczęcia opróżniania silosu nie nastąpił krótkotrwały wzrost koncentracji materiału sypkiego, jak miało to miejsce w przypadku piasku luźnego i ścian szorstkich. W strefie przyściennej koncentracja materiału początkowo nie zmieniła się, zarówno na wysokości $h = 1,0$ m oraz $h = 1,5$ m. W chwili gdy materiał sypki zbliżał się do górnej krawędzi elektrod pomiarowych spadek koncentracji dochodził do $\approx 18\%$ wartości stanu początkowego. Ze względu na niesymetrię przepływu materiału sypkiego nie można było w sposób jednoznaczny określić szerokości strefy ścinania.



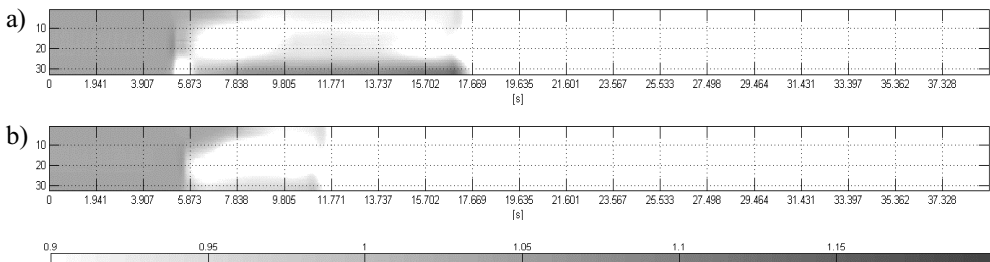
Rys. 5. Zmiany koncentracji piasku luźnego w przypadku ściany szorstkiej dla piksela zlokalizowanego: przy ścianie (p(1, 15)) – linia ciągła; w środku przekroju poprzecznego (p(15, 15)) – linia przerywana (krótsze charakterystyki przedstawiają zmiany koncentracji dla wysokości $h = 1,5$ m, dłuższe dla $h = 1,0$ m)



Rys. 6. Wizualizacja zmian koncentracji (topogram) piasku luźnego (ściana szorstka) na wysokościach: a) $h = 1,0$ m; b) $h = 1,5$ m



Rys. 7. Zmiany koncentracji piasku zagęszczonego dla piksela zlokalizowanego: przy ścianie (p(1, 15)) – linia ciągła; w środku przekroju poprzecznego (p(15, 15)) – linia przerywana (krótsze charakterystyki przedstawiają zmiany koncentracji dla wysokości $h = 1,5\text{m}$, dłuższe dla $h = 1,0\text{ m}$) (ściana szorstka)

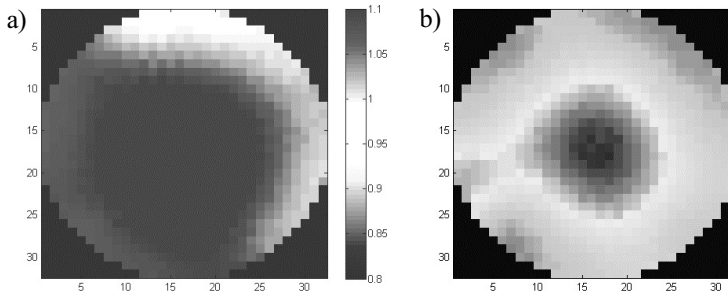


Rys. 8. Wizualizacja zmian koncentracji (topogram) piasku zagęszczonego (ściana gładka) na wysokościach: a) $h = 1,0\text{ m}$; b) $h = 1,5\text{ m}$

5. Wyznaczenie parametrów strefy ścinania

Analiza obrazów zrekonstruowanych zmian koncentracji materiału sypkiego podczas opróżniania silosu umożliwia ocenę szerokości lokalizacji w postaci stref ścinania usytuowanych wzdłuż ścian silosu. Poniżej zamieszczono analizę dla przypadku materiału sypkiego w stanie luźnym przeprowadzoną dla elektrod pomiarowych usytuowanych na poziomie $h = 1,0\text{ m}$. W przypadku ścian gładkich materiał sypki w strefie przyściennej nie ulegał dylatacji (w stosunku do stanu początkowego) jak dla ściany szorstkiej, jego koncentracja (wyznaczana na podstawie obrazów tomograficznych) w praktyce nie zmieniła się (rys. 9a). W przypadku ścian szorstkich przy ścianie występowała lokalizacja w postaci strefy ścinania,

w której dylatacja materiału wynosiła $\approx 5 \div 8\%$ wartości stanu początkowego (rys. 9b). Szerokość strefy ścinania, wyznaczona metodą uproszczoną na podstawie pomiaru ilości pikseli, wynosiła ≈ 20 mm (algorytm wyznaczania parametrów strefy ścinania został opisany poniżej). Ze względu na brak symetrii wypływu materiału sypkiego nie udało się określić wpływu zagęszczenia początkowego na szerokość strefy ścinania. Wcześniejsze doświadczenia pokazały, że wzrost zagęszczenia początkowego powoduje zmniejszenia szerokości strefy ścinania [9, 10].



Rys. 9. Wizualizacja zmian koncentracji (tomogram) piasku luźnego na wysokości $h = 1,0$ m w czasie 7 s opróżniania silosu: a) ściana gładka; b) ściana szorstka

W celu dokładnego wyznaczenia parametrów strefy ścinania, tj. wielkości koncentracji oraz szerokości zastosowany został algorytm przetwarzania zrekonstruowanego obrazu tomograficznego. Etapy algorytmu przetwarzania przykładowego obrazu tomograficznego dla piasku luźnego i ściany szorstkiej zostały pokazane na rysunku 10a. W pierwszym etapie zostają wyznaczone indeksy pikseli należących do strefy ścinania według wzoru:

$$\varepsilon(i) = \begin{cases} 2, & \text{dla } \varepsilon(i) \geq (1 - 0,065 * \bar{C}) * \bar{\varepsilon}, \quad i = \{1, \dots, M\} \\ \varepsilon(i), & \text{dla } \varepsilon(i) < (1 - 0,065 * \bar{C}) * \bar{\varepsilon} \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

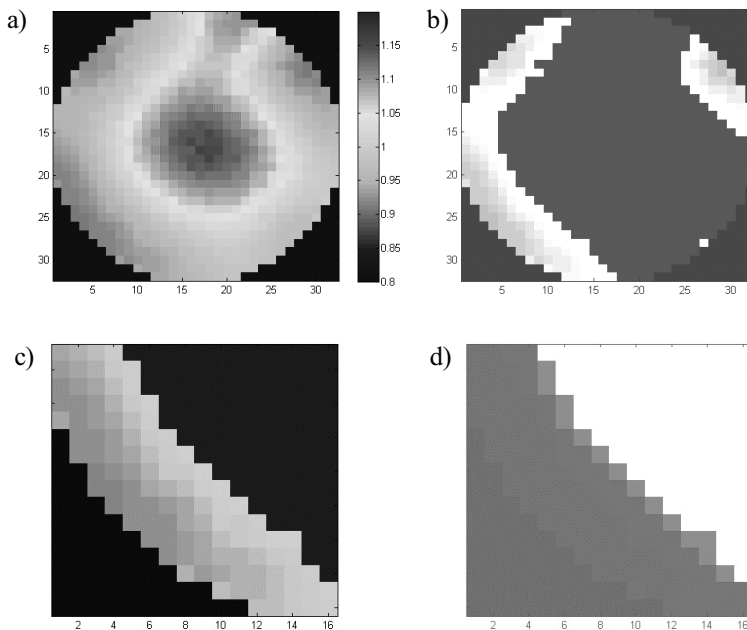
- \bar{C} – średnia znormalizowanych pojemności (zastosowano normalizację modelu równoległego),
- $\bar{\varepsilon}$ – średnia znormalizowanych wartości pikseli w obrazie,
- i – numer piksela,
- M – liczba wszystkich pikseli w zrekonstruowanym obrazie, natomiast wartość 0,065 została dobrana doświadczalnie.

Piksel, którego wartość spełnia warunek przedstawiony w powyższym równaniu, zostaje zakwalifikowany do obszaru strefy ścinania, a jego wartość nie ulega zmianie. Piksele nienależące do strefy ścinania przyjmują wartość 2 (rys. 10b). W związku z niesymetrycznym przepływem dla ścian szorstkich (użyty został papier ścierny drobnoziarnisty) oraz lokalnym

pojawieniem się ziaren piasku między papierem a ścianą silosu podczas opróżniania zbiornika, do dalszej analizy użyta została jedynie część obrazu, dobrze reprezentująca jej rozkład w strefie przyściennej (wycinek koła jako fragment przekroju poprzecznego analizowanego modelu silosu, rys. 10c). Kolejnym etapem było wyznaczenie parametrów, charakteryzujących strefę ścinania – koncentracja oraz rozmiar. W przypadku wyznaczenia koncentracji obliczona została średnia pikseli należących do strefy ścinania. Szerokość strefy ścinania obliczona została poprzez:

- wyznaczenie pikseli p_g leżących na granicy strefy ścinania oraz reszty przekroju silosu w analizowanym obszarze (rys. 10d – piksele te otrzymały wartość 3);
- obliczenie odległości środków tych pikseli od środka przekroju poprzecznego czujnika pomiarowego;
- następnie dla zbioru wyznaczonych odległości obliczona była średnia odległość d_p .

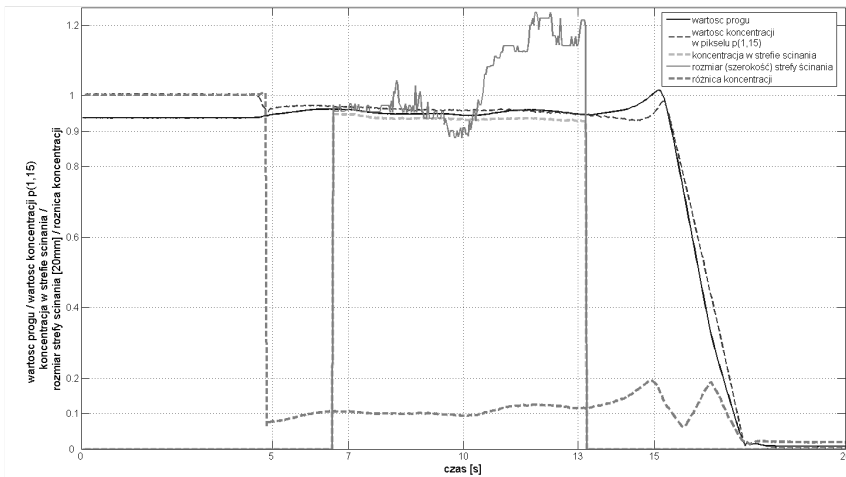
Szerokość strefy ścinania to różnica pomiędzy promieniem silosu d a obliczoną średnią odległością pikseli d_p .



Rys. 10. Etapy przetwarzania obrazu tomograficznego: a) obraz wejściowy; b) obraz po progowaniu; c) obszar analizy strefy ścinania; d) wyznaczenie pikseli leżących na granicy strefy ścinania i reszty obszaru czujnika

Wyznaczenie parametrów strefy ścinania (koncentracji oraz rozmiaru) można przeprowadzić w zadanym przedziale czasu.

Na rysunku 11 pokazane zostały wykresy zmian szukanych parametrów oraz wartości pomocniczych obliczanych podczas działania algorytmu. Szukane parametry wyznaczone były w przedziale czasowym $6,6 \div 13,2$ 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.



Rys. 11. Wykres zmian parametrów strefy ścinania podczas przepływu grawitacyjnego materiału sypkiego

Wyniki pokazały, że szerokość strefy ścinania znajdowała się w przedziale $17,61 \div 24,73$ mm, natomiast koncentracja w przedziale $0,92 \div 0,94$. Wartość średnia tych parametrów to odpowiednio 20,68 mm oraz 0,93, co jest w przybliżeniu równe dylatacji materiału w strefie przysięciennej wynoszącej $\approx 7\%$. Wartość dylatacji w strefie przysięciennej wyznaczona metoda uproszczoną (na podstawie jednego obrazu) dla piasku luźnego wynosiła $\approx 5\%$ (rys. 10b). Wyznaczona szerokość strefy ścinania potwierdza rozważania teoretyczne [3, 4, 6] oraz szerokości uzyskane z pomiarów w czasie opróżniania silosu metoda organoleptyczną.

W celu szczegółowego zbadania zmian koncentracji w przestrzeni czujnika pomiarowego posłużyć się można analizą różnicy pomiędzy koncentracją materiału w obszarze strefy ścinania oraz pozostałego fragmentu czujnika pomiarowego. W przypadku prezentowanych wyników różnica ta w analizowanym oknie czasowym znajdowała się w przedziale $0,094 \div 0,126$, a jej średnia wartość wynosiła 0,108.

6. Wnioski

Elektryczna tomografia pojemnościowa (ECT) umożliwia ilościową ocenę zmian koncentracji materiału sypkiego podczas opróżniania silosu. Możliwe jest określenie wielkości kontraktacji (wzrost koncentracji) oraz dylatacji (spadek koncentracji) materiału sypkiego zarówno w strefie przysięciennej, jak i w przekroju poprzecznym silosu.

Analiza dotychczasowych rezultatów pozwala wysnuć wnioski:

- zachowanie się materiału podczas wypływu z silosu zależy od zagęszczenia początkowego oraz od szorstkości ścian. Piasek luźny wykazuje globalną tendencję do kontrakcji, natomiast piasek zagęszczony wykazuje tendencję do dylatacji;
- w początkowej fazie opróżniania silosu ze ścianami szorstkimi materiał sypki zawiesza się na ścianach, powodując chwilowy wzrost koncentracji materiału w strefie przyściennej, następnie ma miejsce dylatacja materiału i rozwija się przyścienne strefa ścinania;
- możliwość oceny szerokości lokalizacji w postaci szerokości strefy ścinania wzdłuż ścian szorstkich umożliwi w przyszłości ocenę wpływu zmian koncentracji materiału sypkiego na wielkość naporu materiału sypkiego na ściany silosu;
- możliwość diagnostyki szerokości lokalizacji wewnątrz materiału sypkiego umożliwi dokładny opis mechanizmu powstawania efektów dynamicznych poprzez detekcje propagacji zmian koncentracji materiału sypkiego w chwili rozpoczęcia opróżniania silosu.

Podziękowania

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

Literatura

- [1] Kamiński M., *Badania naporu bezkohezyjnych materiałów sypkich w silosach*. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 50, 1986.
- [2] Munch-Andersen J., Nielsen J., *Pressures in slender grain silos. Measurements in three silos of different sizes*. 2nd European Symposium on the Stress and Strain behaviour of Particulate Soilds-Silo Stress, Praha, Czechoslovakia, 1990.
- [3] Niedostatkiewicz M., Tejchman J., *Experimental and theoretical studies on resonance dynamic effects during silo flow*. Powder Handling and Processing, 15, 1, 2003, 36–42.
- [4] Tejchman J., *Dynamic phenomena in model silos*. Internal Report of Institute for Rock and Soil Mechnics, Karlsruhe University, 1987.
- [5] Nielsen J., Ruckebrod C., *A note on dynamic phenomena in silos*. Proc. Int. Conf.: Silos-Forschung und Praxis, Karlsruhe, 1988, 191–209.
- [6] Tejchman J., *Silo-quake – measurements, a numerical polar approach and a way for its supsion*. Thin-Walled Structures, 31/1–3, 1998, 137–158.
- [7] Wensrich C., 2002: *Experimental behaviour of quaking in tall silos*. Powder Technology, 127, 87–94.
- [8] Muite B.K., Quinn F.S., Sundaresan S., Rao K.K., *Silo music and silo quake: granular flow-induced vibration*. Powder Technology, 145, 2004, 190–202.
- [9] Dhoriyani M.L., Jonnalagadda K.K., Kandikatla R.K., Rao K.K., *Silo music: sound emission during the flow of granular materials through tubes*. Powder Technology, 167, 2006, 55–71.
- [10] Buick J.M., Chavez-Sagarnaga J., Zhing Z., Ooi J.Y., Pankaj D.M., Cambell D.M., Greated C.A., *Investigation of silo-honking: slip-stick excitation and wall vibration*. Journal of Engineering Mechanics ASCE, 131, 3, 2005, 299–307.

- [11] Rucka M., Wilde K., Tejchman J., Niedostatkiwicz M., *Zjawisko muzyki silosowej-doświadczenia i model mechaniczny*. XIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Żelbetowe prężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze”, Szklarska Poręba, 2007, 1–8.
- [12] Wilde K., Rucka M., Tejchman J., *Silo-quake-measurements, a numerical polar approach and a way for its suppression*. Powder Technology, <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2007.11.008>, 2007
- [13] Niedostatkiwicz M., Tejchman J., *Reduction of dynamic effects during granular flow in silos*. Powder Handling and Processing, 2008 (w druku).
- [14] Grudzień K., Romanowski A., *Wizualizacja przepływu materiałów stałych w hoperach*. Automatyka (półrocznik AGH), t. 8, z. 3, 2004, 401–408
- [15] Chaniecki Z., Dyakowski T., Niedostatkiwicz M., Sankowski D., *Application of electrical capacitance tomography for bulk solids flow analysis in silos*. Particle and Particle Systems Characterization, 23, 3–4, 2006, 306–312.
- [16] Chaniecki Z., Sankowski D., *Monitoring and diagnosis of dynamics states using process tomography*. Diagnostics of processes and systems, DPS 2007, EXIT, ISBN 978-83-60434-31-4, 2007, 387–394, 456 (in Polish)
- [17] Romanowski A., Grudzień K., Williams R.A., *Analysis and Interpretation of Hopper Flow Behaviour Using Electrical Capacitance Tomography*. Particle and Particle Systems Characterization, 23, 3–4, 2006, 297–305.
- [18] Płaskowski A., Beck M.S., Thorn R., Dyakowski T., *Imaging Industrial Flows: Applications of Electrical Process Tomography*. Bristol, IOP Publishing 1995, 232.
- [19] Yang WQ., Peng L., *Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography*. Meas. Sci. Technol., 14, 2003, r1–r14.
- [20] Lionheart WRB., *Review: Developments in EIT reconstruction algorithms: pitfalls, challenges and recent developments*. Physiol. Meas., vol. 25, 2004, 125–142.
- [21] Williams R.A., Beck M.S. (ed.), *Process Tomography – Principles, Techniques and Applications*. Oxford, Butterworth-Heinemann 1995, 507.