

Krzysztof Grudzień*, Maciej Niedostatkiwicz**,
Zbigniew Chaniecki*, Andrzej Romanowski*, Dominik Sankowski*

Wyznaczanie gęstości upakowania materiału w silosie na podstawie danych pomiarowych elektrycznej tomografii pojemnościowej (ECT)

1. Wprowadzenie

Wysoki poziom automatyzacji procesów technologicznych wymusza konieczność składowania i gromadzenia materiałów w celu ich dalszego przetworzenia w systemie pracy ciągłej. W celu optymalizacji składowania około 60% materiałów i półproduktów wytwarzanych na świecie występuje jako materiały granulowane o rozdrobnionej strukturze. Sytuacja ta odnosi się zarówno do materiałów pochodzenia organicznego, jak również materiałów syntetycznych, powstałych w wyniku procesu przetworzenia produktów bazowych [1]. Większość materiałów granulowanych składowana jest w zasobnikach naziemnych, z których znaczną część stanowią silosy. Eksploatacja silosów wymaga doskonałej znajomości zachowania się materiałów granulowanych, zarówno na etapie napełniania, jak również składowania i opróżniania. Niezależnie od zakresu problemów związanych z użytkowaniem konstrukcji silosowych na każdym z wymienionych etapów ich awaryjność jest zwiększona w porównaniu z innymi obiektami budowlanymi [2–4]. Zagrożenia bezpieczeństwa konstrukcji oraz bezpieczeństwa użytkownika silosu występują najczęściej w postaci stanu przedawaryjnego lub wręcz doprowadzają do awarii, a nawet katastrofy budowlanej. Do głównych problemów związanych z eksploatacją silosów należą: lokalna utrata stateczności płaszczy, wybuchy pyłów, powstawanie odkształceń w przepływającym materiale sypkim, efekty dynamiczne oraz tworzenie się sklepień nad otworami wylotowymi. Problemy te występują podczas opróżniania silosów w skali naturalnej, jak również w skali półprzemysłowej, dla przypadku opróżniania grawitacyjnego oraz kontrolowanego, w praktyce niezależnie od kształtu przekroju poprzecznego, jak również rodzaju składowanego w silosie materiału sypkiego.

* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka

** Katedra Podstaw Budownictwa i Inżynierii Materiałowej, Politechnika Gdańska

Aktualnie do najistotniejszych problemów związanych z eksploatacją silosów należą efekty dynamiczne, a w wśród nich tzw. silne efekty powstające samowzbudnie podczas opróżniania silosów [5–10]. Efekty te powstają podczas wypływu materiału sypkiego z silosu, który to przepływ związany jest ze zmianami objętościowymi występującymi w materiale sypkim. Zmiany objętościowe sprzężone są bezpośrednio z powstawaniem lokalizacji odkształceń w postaci stref ścinania, które tworzą się zarówno wewnątrz struktury przepływającego materiału, jak i w strefach przyściennych, i wpływają bezpośrednio na rozkład naporu materiału sypkiego na ściany oraz na dno silosu. Zmiana naporu wpływa natomiast bezpośrednio na wielkość naprężeń w ścianach i silosu i decyduje bezpośrednio o bezpieczeństwie konstrukcji oraz bezpieczeństwie użytkownika zbiornika.

Celem prac, których pierwsze uzyskane wyniki zostały opisane w niniejszym artykule, jest próba wyznaczenia dokładnej zależności między wartością zmian koncentracji powstających w materiale sypkim a zmianami pojemności rejestrowanymi z zastosowaniem tomografii pojemnościowej [11–13]. Zmiany koncentracji przedstawione zostały w formie zmian wartości wskaźnika porowatości materiału sypkiego. W artykule przedstawiono wstępne wyniki analizy dla przypadku napełniania i składowania piasku w silosie ze ścianami gładkimi. Prezentowane wyniki badań stanowią część programu badawczego którego celem jest opracowanie tomograficznego systemu do bezinwazyjnej diagnostyki przepływu materiału sypkiego w silosach [14–16]. Wyznaczenie relacji między zmianą pojemności a koncentracji materiału sypkiego w obszarze pomiarowym pozwoli na lepsze wykorzystanie tomografów pojemnościowych w systemach kontroli i sterowania procesem przemysłowym.

2. Opis stanowiska badawczego

Eksperymenty badawcze wykonane zostały z zastosowaniem cylindrycznego, smukłego modelu silosu wykonanego z transparentnego PMM (polimetakrylan metylu) ($d = 0,2$ m, $h = 2,0$ m, grubość ścian $t_w = 0,005$ m). Jako materiał sypki zastosowano średnioziarnisty piasek ze średnią średnicą ziarna $d_{50} = 0,8$ mm. Silos ustawiony był na sztywnej ramie stalowej i zamocowany w poziomie płaskodennego dna. Doświadczenia przeprowadzone zostały dla otworu wylotowego $d_0 = 0,07$ m, umieszczonego symetrycznie w dnie silosu, dla przypadku ścian gładkich oraz bardzo szorstkich. Podwyższenie szorstkości ścian uzyskano poprzez wyklejenie wewnętrznej strony płaszcza silosu papierem ściernym „40”: $r_w \approx d_{50}$ (r_w – szorstkość ścian).

Podczas doświadczeń ze ścianami gładkim występowały silne efekty dynamiczne (zwane w literaturze technicznej popularnie *muzyka silosowa*), będące wynikiem dynamicznej interakcji pomiędzy przepływającym materiałem sypkim a konstrukcją silosu. Zjawiska dynamiczne występowały od połowy wysokości silosu bezpośrednio od chwili rozpoczęcia jego opróżniania i zanikały w chwili przejścia przepływu masowego w kominowy [5–10].

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów jedynie dla przypadku napełniania i składowania piasku w silosie ze ścianami gładkimi. Silos napełniany był różnymi metodami: przez lej umieszczony na stałej wysokości nad silosem (materiał granulowany w stanie luźnym – metoda LGG), przez sito umieszczone na stałej wysokości nad silosem (materiał granulowany w stanie zagęszczonym – metoda ZGG). Średnica otworu leja zsykowego wynosiła 0,11 m, w przypadku sit zastosowano zróżnicowane wymiary otworów: 32×32, 16×16 oraz 8×8 mm, we wszystkich przypadkach odległości pomiędzy kwadratowymi otworami siatki sit wynosiły 4 mm. Dla objętych analizą przypadków napełniania silosu wyznaczono na podstawie podstawowych wzorów z mechaniki gruntów [17] ciężar objętościowy szkieletu gruntowego γ_d oraz wskaźnik porowatości materiału sypkiego e_0 . Gęstość właściwą szkieletu gruntowego ρ_s można wyznaczyć jako:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (1)$$

gdzie:

m_s – masa szkieletu gruntowego,

V_s – objętość szkieletu gruntowego (bez porów i kapilarów).

Przyjęto na podstawie doświadczeń $\rho_s = 26,5 \text{ g/cm}^3$.

Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ρ_d :

$$\rho_s = \frac{m_s}{V} \quad (2)$$

gdzie V – objętość gruntu.

Ciężar właściwy (objętościowy) gruntu γ_s (γ_d):

$$\gamma_s (\gamma_d) = \rho_s (\rho_d) \cdot g \quad (3)$$

gdzie g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2].

Wskaźnik porowatości gruntu e_0 :

$$e_0 = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} \quad (4)$$

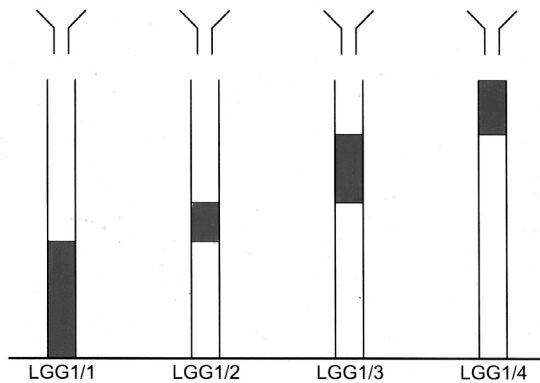
Zbiornicze zestawienie wyników dla pomiarów parametrów piasku w stanie luźnym, zmieniających się sukcesywnie w miarę napełniania silosu przedstawiono w tabeli 1. Napełnianie według metody LGG jest najbardziej powszechnym sposobem napełniania silosu w przemyśle, dlatego też zmiana wskaźnika porowatości e_0 przeanalizowana została dla różnych poziomów napełnienia materiałem sypkim. Schemat pomiaru zmiany parametrów materiału sypkiego podczas napełniania silosu przedstawiono na rysunku 1. Dla przypadku

napętnienia materiałem w stanie zagęszczonym (metoda ZGG) analizie poddano jedynie stan końcowy – przypadek całkowitego wypełnienia silosu piaskiem, co przedstawiono w tabeli 2. W celach porównawczych zamieszczono również pojedynczy pomiar dla materiału w stanie luźnym (metoda LGG).

Tabela 1

Charakterystyka zmian koncentracji piasku w czasie dla przypadku napętnienia przez lej (LGG1)

Nr pomiaru	Wysokość piasku powyżej dna silosu h [m]	Waga piasku g [kg]	Ciężar objętościowy szkieletu gruntowego γ_d [kN/m ³]	Wskaźnik porowatości gruntu e_0 [-]
LGG1/1	0,84	0,3392	16,36	0,6189
LGG1/2	1,12	0,5241	16,16	0,6389
LGG1/3	1,61	0,7435	15,93	0,6635
LGG1/4	2,00	0,9195	15,91	0,6662



Rys. 1. Schemat pomiaru zmiany parametrów materiału sypkiego podczas napętnienia silosu dla przypadku LGG1 (kolorem szarym oznaczono przyrost materiału dla analizowanego poziomu napętnienia silosu)

Tabela 2

Charakterystyka zmian koncentracji piasku w czasie dla różnych metod napętnienia

Nr pomiaru	Wysokość piasku powyżej dna silosu h [m]	Waga piasku g [kg]	Ciężar objętościowy szkieletu gruntowego γ_d [kN/m ³]	Wskaźnik porowatości gruntu e_0 [-]
LGG2	2,00	40,69	16,07	0,6487
ZGG32	2,00	53,43	17,63	0,5037
ZGG16	2,00	75,79	17,70	0,4971
ZGG8	2,00	93,73	17,87	0,4829

3. Aparatura pomiarowa

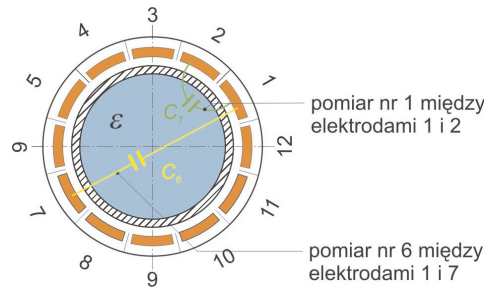
Zastosowana technika pomiarowa to wspomniana elektryczna tomografia pojemnościowa (*Electrical Capacitance Tomography* – ECT). Opis techniki pomiaru i wizualizacji wnętrza nieprzezroczystych, zamkniętych instalacji przemysłowych monitorowanych przy zastosowaniu ECT nie jest w poniższym artykule omawiany. Szczegóły opisu narzędzi tomograficznych można znaleźć w [18–19].

Użyty tomograf pojemnościowy umożliwił podłączenie dwóch czujników. Każdy z czujników składał się z 12 elektrod. Czujniki ułożone zostały na dwóch wysokościach: 0,5 m oraz 1,5 m (rys. 2). Dokonanie pomiaru na dwóch wysokościach pozwoli w przyszłości również na zbadanie wpływu wysokości słupa materiału sypkiego na koncentrację materiału. W prezentowanych wynikach analiza dotyczy tylko czujnika zamontowanego na wysokości 0,5 m. Przed przystąpieniem do właściwych pomiarów przeprowadzane zostały pomiary wstępne, których celem było przygotowanie optymalnych wartości parametrów torów wzmacnień tomografu.

a)



b)



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10	1-11	1-12
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	2-9	2-10	2-11	2-12
		22	23	24	25	26	27	28	29	30
		3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	3-9	3-10	3-11	3-12
			31	32	33	34	35	36	37	38
			4-5	4-6	4-7	4-8	4-9	4-10	4-11	4-12
				39	40	41	42	43	44	45
				5-6	5-7	5-8	5-9	5-10	5-11	5-12
					46	47	48	49	50	51
					6-7	6-8	6-9	6-10	6-11	6-12
						52	53	54	55	56
						7-8	7-9	7-10	7-11	7-12
							57	58	59	60
							8-9	8-10	8-11	8-12
								61	62	63
								9-10	9-11	9-12
									64	65
									10-11	10-12
										66
										11-12

Rys. 2. Stanowiska badawcze: a) widok ogólny; b) rozmieszczenie elektrod pomiarowych wokół silosu (z rozkład materiału wewnątrz czujnika o przenikalności ϵ) oraz trójkąt pomiarowy dla 12-elektrodowego czujnika

4. Analiza wyników pomiarów

Przeprowadzona analiza wyników dotyczyła znormalizowanych danych pomiarowych. Wyznaczenie charakterystyki zależności pomierzonych pojemności od koncentracji materiału w czujniku pozwoli w kolejnym etapie prac na wyznaczenie błędu pomiaru i dokładności użytej aparatury pomiarowej. W niniejszej pracy przeanalizowany został wpływ zmian koncentracji materiału na pomiar pojemności dla różnych odległości międzyelektrodowych. W przypadku zastosowania 12-elektrodowego czujnika (rys. 2b), odległości te są w przedziale od 1 – dla przyległych elektrod (odległość najmniejsza – C_1), do 6 – leżących naprzeciw siebie (maksymalna odległość – C_6). Zastosowanie cylindrycznego silosu wymusiło na piasku symetryczny oraz zbliżony do symetrycznego rozkład koncentracji względem środka silosu. W celu zmniejszenia błędu oszacowania charakterystyki zmian pojemności dla poszczególnych odległości międzyelektrodowych analizowane w dalszej części pojemności ($C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$) zostały wyznaczone jako średnie z wszystkich możliwych kombinacji pomiarowych zgodnych z odległością międzyelektrodową. W przypadku elektrod przyległych średnia wartość analizowanych pojemności C_1 została wyznaczona według wzoru:

$$C_1 = \frac{\sum_{i=1, j=i+1}^{n-1} C_{i,j}}{k} \quad (5)$$

gdzie:

$C_{i,j}$ – zmierzona pojemność między elektrodami i oraz j ,

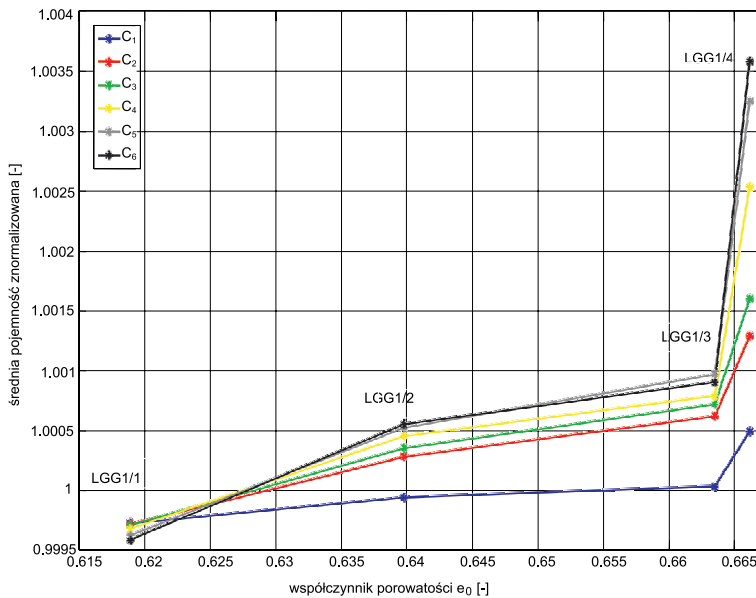
i, j – numer elektrody czujnika pomiarowego,

k – liczba pomiarów pojemności dla tej samej odległości międzyelektrodowej.

Interpretując poszczególne wartości uśrednionych pojemności C_1, \dots, C_6 należy rozważyć wpływ zmian koncentracji w poszczególnych obszarach czujnika na pomiary. Pojemności międzyelektrodowe dla przyległych elektrod C_1 obejmują pomiarem obszar przyścienny, natomiast pojemności C_6 to pojemności, których zmiana jest widoczna dla zmiany koncentracji materiału zarówno w obszarze przyściennym, jak i w środku czujnika (rys. 2b). Pozostałe pojemności są czułe na zmiany koncentracji materiału w obszarach pomiędzy obszarem przyściennym a środkowym czujnika.

Dla przypadku napełniania przez lej (LGG1) wyznaczony metodami analitycznymi ciężar objętościowy materiału sypkiego γ_d ulegał sukcesywnemu zmniejszeniu aż do $\approx 3\%$ od wartości w stanie początkowym (po pierwszym pomiarze) (tab. 1). Jednocześnie globalny wskaźnik porowatości wzrósł $\approx 8\%$. Bezpośrednią przyczyną był fakt napełniania silosu przez lej ze stałą wysokością, co powodowało, że w miarę wzrostu słupa materiału sypkiego malała wysokość spadku materiału sypkiego. Jednocześnie wzrost wysokości napełnienia silosu spowodował wzrost koncentracji piasku w poziomie pomiarowym 0,50 m powyżej dna. Analizując zmiany pojemności dla stref bliżej ścian silosu (pojemności C_1, C_2, C_3)

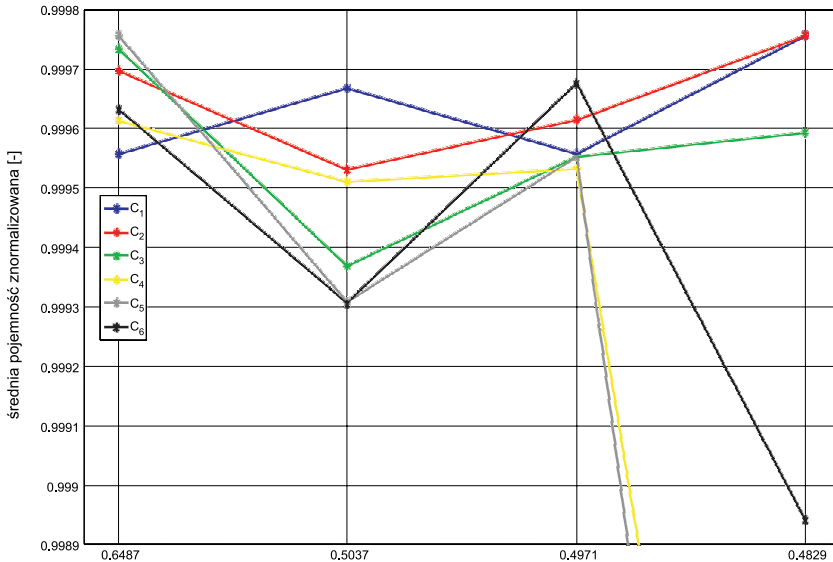
można stwierdzić, że wzrost koncentracji w strefie przyściennej był mniejszy niż to miało miejsce w rdzeniu silosu (analiza pojemności C_4 , C_5 , C_6) (rys. 3). Przyczyną wzrostu koncentracji w osi symetrii silosu jest fakt centrycznego napełniania, natomiast spadek koncentracji w strefie przyściennej spowodowany jest bezpośrednio zsuwaniem się ziaren po poboczniczy stożka usypanego w osi symetrii materiału, co powoduje rozluźnienie jego struktury w strefie przyściennej. Należy jednak zauważyć, że różnice w pomierzonych pojemnościach C_i dla stanu całkowitego wypełnienia silosu dla przypadku koncentracji w strefie przyściennej oraz w środku symetrii silosu wynosiły zaledwie $\approx 0,3\%$ i mogły być spowodowane niedokładnością pomiarową tomografu. Jednakże wzrost pojemności wykazały wszystkie konfiguracje par elektrod, co świadczy o poprawnej reakcji narzędzia pomiarowego na zmianę koncentracji materiału w obszarze czujnika.



Rys. 3. Zależność pomiędzy pojemnościami znormalizowanymi C_i w poziomie 0,5 m powyżej dna a wskaźnikiem porowatości e_0 podczas napełniania silosu dla przypadku LGG1

Dla zróżnicowanych metod napełniania silosu wyznaczony metodami analitycznymi – dla całkowitego wypełnienia zbiornika – ciężar objętościowy materiału sypkiego γ_d ulegał sukcesywnemu zwiększeniu (tab. 2). Wzrost ciężaru miał miejsce o wartość $\approx 11\%$, co odpowiadało zmniejszeniu wartości wskaźnika porowatości $\approx 26\%$ (dla metody ZGG8 w porównaniu z metodą LGG2). Niezależnie od metody napełniania silosu różnice w rozkładzie pomierzonej koncentracji C_i wynosiły $\approx 0,3-1\%$. Dla napełniania metodą przez lej (LGG2) różnice pomiędzy koncentracją w strefie przyściennej a w środku przekroju silosu wynosiły $\approx 0,3\%$ i były zbliżone do różnic uzyskanych w przypadku pomiarów zmian porowatości na różnych wysokościach wypełnienia silosu materiałem w stanie luźnym (LGG1). W przy-

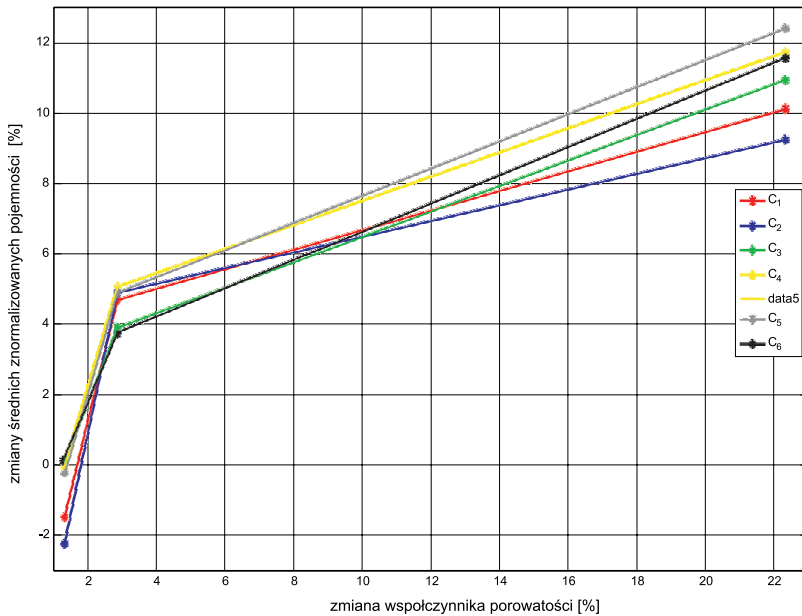
padku napełniania przez sito stwierdzono, że wzrost ciężaru objętościowego (zwiększenia zagęszczenia materiału sypkiego) powoduje wzrost koncentracji w strefie przyściennej, natomiast sukcesywne zmniejszenie koncentracji w strefie docelowego rdzenia przepływu (rys. 4).



Rys. 4. Zależność pomiędzy średnimi pojemnościami znormalizowanymi C_i w poziomie 0,5 m powyżej dna a wskaźnikiem porowatości e_0 podczas napełniania silosu różnymi metodami

Rysunek 5 przedstawia zmiany pojemności spowodowane zmianą wskaźnika porowatości. Zależności te przedstawione zostały w procentach. Przedstawione wyniki uzyskane zostały dla następującej metodologii badań: napełniono silos za pomocą leja (LGG2) i przeprowadzono kalibracje, następnie dla tych ustawień kalibracyjnych do silosu, używając sita o oczkach 32×32 mm (ZGG32) wsypano ponownie piasek. Otrzymany rezultat pomiaru dla piasku zagęszczonego za pomocą sita 32×32 mm (ZGG32) różnił się zasadniczo od wyników dla piasku luźnego uzyskanego za pomocą leja (LGG2). Wzrost wartości koncentracji piasku wymusił wzrost pojemności uzyskanych między kolejnymi kombinacjami elektrod. Analiza została przeprowadzona dla zmiany wskaźnika porowatości uzyskanej przez porównanie zasypania silosu przez:

- sito 32×32mm (ZGG32), porównane z zasypaniem przez lej (LGG2),
- sito 16×16 mm (ZGG16), porównane z zasypaniem z zastosowaniem sita 32×32 mm (ZGG32),
- sito 8×8 mm (ZGG8), porównane z zasypaniem z zastosowaniem sita 16×16 mm (ZGG16) (tab. 2).



Rys. 5. Zależność zmian średnich znormalizowanych pojemności C_i w stosunku do zmiany wskaźnika porowatości e_0

Pierwszy punkt na wykresie oznacza zmianę wskaźnika porowatości dla porównania przypadku napełniania przez lej (LGG2) oraz sito 32×32 mm (ZGG32), punkt drugi oznacza zmianę dla przypadku sito 32×32 mm (ZGG32)/sito 16×16 mm (ZGG16), natomiast punkt trzeci oznacza zmianę dla przypadku sito 16×16 mm (ZGG16)/sito 8×8 mm (ZGG8).

Uzyskane, dla przypadku napełnienia silosu wyniki pokazały, że wzrost koncentracji materiału sypkiego (wzrost ciężaru objętościowego przy jednoczesnym zmniejszeniu wskaźnika porowatości) powoduje istotny, przekraczający wartość 10% wzrost pojemności elektrodowych przy zmniejszeniu wskaźnika porowatości nieprzekraczającym $\approx 25\%$. Spadek wskaźnika porowatości materiału sypkiego skutkuje podwyższeniem wrażliwości pomiarowej elektrod i podwyższonym zróżnicowaniem pomierzonych koncentracji między strefą przyścienną a strefą w środku symetrii silosu.

5. Wnioski

Uzyskane wyniki jednoznacznie potwierdziły, że wzrost ciężaru objętościowego materiału składowanego w silosie powoduje zmniejszenie wskaźnika porowatości.

Sposób napełniania silosu wpływa na rozkład koncentracji materiału sypkiego w przekroju poprzecznym silosu. Dla przypadku piasku w stanie luźnym wyznaczony z zastosowaniem tomografu pojemnościowego wzrost koncentracji w strefie przyściennej jest mniejszy

niż w osi docelowego rdzenia przepływu. W przypadku piasku w stanie zagęszczonym koncentracja materiału na powierzchni przekroju poprzecznego jest bardziej zrównoważona z jednoczesną tendencją do wzrostu w strefie przyściennej.

Dla napełniania silosu i początkowej fazy składowania materiału sypkiego w zbiorniku pomierzone różnice pojemności C_i wykazują różnice o średniej wartości $\approx 0,5\%$, co wskazuje na dużą dokładność pomiarów z zastosowaniem metody ECT, a jednocześnie potwierdza, że dla przyjętej metody napełniania silosu zróżnicowanie porowatości w przekroju poprzecznym jest nieznaczne. Istotne jest też określenie poziomu najmniejszych możliwych zmian koncentracji materiału, które wykryje tomograf. Poziom obserwowanych zmian wskaźnika porowatości materiału sypkiego mieścił się w zakresie do 25%.

W celu jednoznacznego określenia zależności pomiędzy zmianą wskaźnika porowatości a pomierzonymi pojemnościami C_i oraz w celu określenia związków korelacyjnych pomiędzy pojemnościami elektrodowymi a ciężarem objętościowym konieczne jest wyznaczenie zależności dla innych poziomów elektrod pomiarowych. Ponadto niezbędne jest zbadanie wpływu papieru ściernego jako elementu modelującego przypadek ściany bardzo szorstkiej na rozkład pojemności elektrodowych.

Podziękowania

Autorzy dziękują za wsparcie badań poprzez grant badawczy (167/6, PR UE/2007/7).

Literatura

- [1] Seville JPK., Tuzun U., Clift R., *Processing of Particulate Solids*. Blackie Academic, London, 1997, 1–377.
- [2] Eibl, J., *Investigation on silo pressures*. Proc. of the 2nd International Conference on Silos and Storage Installations, Teheran, 1992, 1–24.
- [3] Niedostatkiewicz, M., Normant, K., *Uwarunkowania prawne redukcji efektów dynamicznych występujących podczas opróżniania silosów*. International Workshop „City of tomorrow and cultural heritage-Pomerania outlook”, Gdańsk, vol. 1, 2005, 49–52.
- [4] Niedostatkiewicz M., Normant K., *Redukcja efektów dynamicznych podczas opróżniania silosów w świetle obowiązujących przepisów prawnych*. Przegląd Budowlany, Warszawa, 3, 2006, 31–34.
- [5] Tejchman J., *Silo-quake-measurements, a numerical polar approach and a way for its suppression*. Thin-Walled Structures, 31/1–3, 1998, 137–158.
- [6] Wensrich C., *Experimental behaviour of quaking in tall silos*. Powder Technology, 127, 2002, 87–94.
- [7] Niedostatkiewicz M., Tejchman J., *Experimental and theoretical studies on resonance dynamic effects during silo flow*. Powder Handling & Processing, 15, 1, 2003, 36–42.
- [8] Wilde K., Rucka M., Tejchman J., *Silo music-mechanism of dynamic flow and structure interaction*. Powder Technology, 186, 2008, 113–129.
- [9] Niedostatkiewicz M., Tejchman J., *Reduction of dynamic effects during granular flow in silos*. Bulk Solids & Powder Science & Technology, 1, 3, 2008, 51–55.
- [10] Wilde K., Tejchman J., Rucka M., Niedostatkiewicz M., *Experimental and theoretical investigations of silo music*. Powder Technology, 2009 (w druku).

- [11] Jeanmure L.F.C., Dyakowski T., Zimmerman, W.B.J., Clark W., *Direct flow-pattern identification using electrical capacitance tomography*. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26, 2002, 763–773.
- [12] Jeanmeure L.F.C., Dyakowski T., Zimmerman W.B.J., Baker G., *Use of Raw Capacitance Tomography Data for Flow Pattern Control*. *Proceedings of 2nd World Congress on Industrial Process Tomography*, Hannover, Germany, 2001, 12–19.
- [13] Płaskowski A., Beck M.S., Thorn R., Dyakowski T., *Imaging industrial flows, applications of electrical process tomography*. Institute of Physics Publishing, Bristol, 1995, 214.
- [14] Grudzień K., Chaniecki Z., Niedostatkiwicz M., Romanowski A., Sankowski D., *Description of the dynamic silo discharging in tomographical process diagnosis*. *The 5th International Symposium on Process Tomography*, Zakopane, 1–6, PT08_cr27, 2008.
- [15] Niedostatkiwicz M., Grudzień K., Chaniecki Z., Tejchman J., *Determination of the bulk solid concentration changes during granular flow in a model silo with ECT sensors*. *Chemical Engineering Science*, 64, 2008, 20–30.
- [16] Grudzień K., Niedostatkiwicz M., Chaniecki Z., *Application of ECT method for detection of bulk solid vibration during silo emptying process using raw data and reconstructed images*. *The 3rd International Workshop on Process Tomography (IWPT3)*, Tokyo, 70, 56, 2009, 1–8.
- [17] Bolt A., Cichy W., Topolnicki M., Zadroga B., *Mechanika gruntów w zadaniach*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1985, 1–283.
- [18] Williams R.A., Beck M.S. (eds.), *Process Tomography – Principles, Techniques and Applications*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1995, 1–507.
- [19] Scott D.M., McCann H., *Process Imaging for Automatic Control*. Taylor and Francis Group, 2005, 1–439.