

Krzysztof Grudzień*, Jerome Adrien**, Laurent>About*,
Andrzej Romanowski*, Zbigniew Chaniecki*

Ilościowa analiza porowatości materiału sypkiego z zastosowaniem systemu tomografii promieniowania X

1. Przemysłowe systemy tomografii

Obrazowanie wnętrza obiektów za pomocą technik tomograficznych opiera się na zbieraniu sygnałów pomiarowych z czujników ulokowanych na zewnątrz badanego obiektu i wizualizacji stanu procesu bądź jego struktury w postaci obrazów 2D bądź 3D [25, 33, 37]. Uzyskana informacja wizyjna obrazować może z jednej strony dynamiczne zjawiska fizyczne zachodzące wewnątrz urządzeń i aparatów przemysłowych [4, 10, 22, 31, 32], z drugiej natomiast statyczną mikrostrukturę skanowanego materiału [3, 6, 7, 11, 27, 34, 38]. Wybór rodzaju tomografu dokonywany jest w zależności od celu zastosowania. W przypadku pomiaru dynamicznych procesów przemysłowych, np.: w instalacjach przepływowych, stosowane są systemy tomograficzne umożliwiające szybką rejestrację pomiarów (np.: tomografy elektryczne – ECT, ERT czy tomografy optyczne), natomiast w celu zobrazowania, a następnie przeprowadzenia dokładnych pomiarów mikrostruktur materiałów, wybór pada na tomografy promieniowania X bądź gamma. Ten drugi rodzaj tomografu charakteryzuje się relatywnie małą prędkością pomiaru, ale dostarcza obrazy o wysokiej jakości. Będąc w ciągłym rozwoju systemy te są stosowane nawet do badań nad wielofazowymi przepływami, dzięki zwiększeniu prędkości zbierania danych (kosztem jakości wizualizacji) i dostosowaniu rozmiarów instalacji do systemów pomiarowych [12, 14, 17 18]. Kompromisem wydają się badania przy użyciu tomografów promieni X do analizy mikrostruktur w procesach odkształcania czy deformacji badanego obiektu w trakcie pomiaru. Odpowiedni dobór parametrów tomografu pozwala na wizualizacje obiektu w skali mikro z prędkością obrazowania od kilku do kilkunastu ramek na sekundę [2, 3, 6, 8, 27, 28].

W artykule opisane jest zastosowanie transmisyjnego tomografu promieni X w celu pomiaru porowatości materiału sypkiego [5, 13, 24, 38]. Zastosowanie dokładnej metody wizualizacji umożliwi w kolejnym etapie badań wyznaczenie błędu odwzorowania poro-

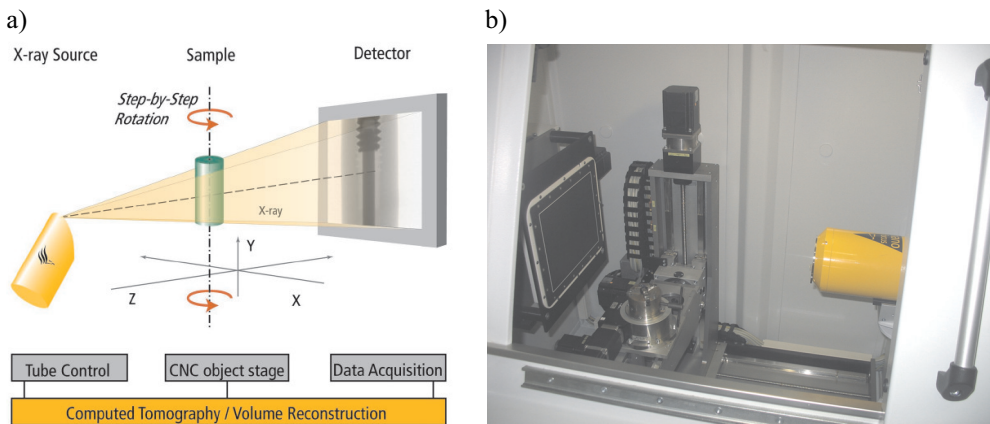
* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka

** Université de Lyon, INSA-Lyon, MATEIS CNRS, Villeurbanne, France

watości materiałów sypkich przy zastosowaniu innej techniki tomografii – elektrycznej tomografii pojemnościowej. Dane pomiarowe z tomografu promieni X posłużyć mają jako wzorzec do poprawnej interpretacji wyników ECT (zarówno surowych danych pomiarowych jak również zrekonstruowanych obrazów tomograficznych). Znając rzeczywistą zmianę porowatości materiału (poprzez analizę obrazów tomograficznych 3D oraz radiogramów 2D z tomografu promieni X) w trakcie zarówno testów statycznych, jak i w trakcie dynamicznego rozładowywania silosu możliwe będzie wyznaczenie błędu pomiaru przy pomocy tomografu ECT. Wynikiem tych prac ma być określenie zdolności (dokładności) analizy ilościowej danych pomiarowych pochodzących z tomografu ECT dla ośrodków sypkich.

2. Elementy składowe tomografu promieni X

Badając możliwość zastosowania promieni X do badania porowatości ośrodka sypkiego, należy się przyjrzeć elementom, z których zbudowany jest tomograf. Przed przystąpieniem do analizy wpływu poszczególnych elementów tomografu na jakość pomiaru należy uściślić, jaka konfiguracja tomografu będzie rozważana. W zależności od rodzaju zastosowanej pary źródło – detektor promieniowania X można wymienić tomografy z wiązką wachlarzową (detektor stanowi jednowymiarowa linia) [12, 17, 18, 26] oraz stożkową (detektor stanowi dwuwymiarowa matryca) [28, 29]. W badaniach używano drugiego rodzaju tomografu i wszelkie opis dotyczyć będą właśnie tego rozwiązania (rys. 1).



Rys. 1. System tomografu promieni X firmy Phoenix|x-ray: a) schemat; b) fotografia

Poprawne ustawianie parametrów poszczególnych bloków systemu pomiarowego pozwala na wydobycie informacji: o badanym obiekcie, o jak największym znaczeniu nauko-

wym oraz dokładności. W skład tomografu promieni X wchodzi następujące (główne) elementy [22]:

- źródło promieniowania,
- detektor promieniowania,
- blok rotacji obiektu,
- komputer.

Komputer przede wszystkim spełnia rolę bloku pozyskiwania danych, ich zrekonstruowania, zobrazowania oraz w końcowym etapie ich ilościowej analizy. W poniższym artykule opis procesu rekonstrukcji obrazu tomograficznego został pominięty. W literaturze można znaleźć wiele pozycji opisujących szeroko stosowane algorytmy rekonstrukcji obrazu wykorzystujące metodę liniowej projekcji wstecznej z filtracją (*filtered backprojection*), rekonstrukcji Fouriera czy algebraiczną technikę rekonstrukcji [19, 27, 30]. Parametrem rekonstruowanym jest współczynnik osłabienia promieniowania (przez obecność badanego obiektu w strefie pomiaru) na drodze źródło-detektor. Optymalnie dobrane ustawienia tomografu pozwalają na lepsze zobrazowanie badanej struktury. W kolejnych rozdziałach artykułu opisany zostanie wpływ poszczególnych parametrów elementów systemu na jakość pomiaru, z uwzględnieniem opisu zjawisk fizycznych, mających miejsce przy interakcji promieniowania z badaną materią.

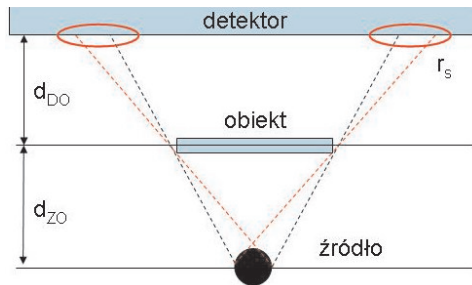
Systemy tomografii X-ray opierają się na wygenerowaniu promieniowania elektronów z wykorzystaniem systemu elektrod nazywanych katodą i anodą [3, 22, 25]. Dwa parametry mające wpływ na siłę promieniowania, a co jest z tym związane na interakcję z badaną materią, to przyłożone napięcie między katodą i anodą oraz prąd anodowy. Parametry te określają maksimum energii (keV) niesione przez fotony oraz liczbę emitowanych fotonów – maksimum dawki strumienia promieniowania. Odpowiedni dobór tych parametrów uzależniony jest rodzajem badanego obiektu. Dla obiektów o małej szerokości oraz małej gęstości stosuje się mniejszą energię promieniowania (w przypadku plastiku jest zazwyczaj zakres: 50–70 kV, dla metalu o grubości 5–10 mm jest to 120–160 kV) [22]. Odpowiednie dobranie prądu anody skutkuje lepszym stosunkiem sygnału do szumu na obrazie. Dodatkowym, bardzo istotnym elementem źródła promieniowania jest rozmiar plamki s (średnica) na źródle promieni X (*X-ray tube*). Jest to miejsce na anodzie, które emituje promieniowanie X. Wielkość tego obszaru ma wpływ na jakość powiększenia obrazowanego obiektu na detektorze. W zależności od jej rozmiaru źródło może emitować promieniowanie z większą energią (dla większej średnicy, ale kosztem rozmycia wynikowego obrazu – rys. 2) bądź mniejszą energią (w przypadku mniejszej średnicy) [16]. Kolejny kluczowy problem to ustawienie odpowiedniej konfiguracji geometrycznej systemu, szczególnie ustalenie odległości detektor – obiekt – źródło, ma istotny wpływ na obraz obiektu na detektorze, jego jakość oraz powiększenie. Zbliżając obiekt do źródła otrzymujemy większe powiększenie. Zarówno położenie obiektu między źródłem i detektorem, jak i rozmiar plamki promienio-

wania są parametrami, mającymi wpływ na rozmycie radiogramu uzyskanego na detektorze (rys. 2). Rozmycie obrazu na detektorze można przedstawić w postaci wzoru [11]:

$$r_S = s \cdot \frac{d_{DO}}{d_{ZO}} \quad (1)$$

gdzie:

- s – średnica plamki promieniowania,
- d_{DO} – odległość detektor-badany obiekt,
- d_{ZO} – odległość źródło-badany obiekt.



Rys. 2. Geometryczne rozmycie obrazu spowodowane rozmiarem źródła promieniowania

Powiększenie geometryczne M w płaszczyźnie obiektu można zapisać jako [11]:

$$M = \frac{d_{DO} + d_{ZO}}{d_{ZO}} \quad (2)$$

Oprócz rozmycia obrazu wynikającego z wielkość plamki źródła oraz odległości źródło-obiekt-detektor wpływ na całkowitą rozdzielczość systemu ma detektor. Znajac rozdzielczość detektora r_D , można wyznaczyć całkowitą rozdzielczość systemu poprzez wyznaczenie r_{total} [11]:

$$r_{total} = \frac{\sqrt{r_D^2 + r_S^2}}{M} \quad (3)$$

Generalna zasad ustawienia próbki polega na położeniu jej jak najbliżej źródła promieniowania i zastosowaniu małego rozmiaru źródła s . Dodatkowo zastosowanie detektora o lepszej rozdzielczości poprawia jakość obrazowania.

3. Zasady działania tomografu promieni X

Możliwość obrazowania struktur obiektów znajdujących się w obszarze promieniowania X bazuje na zasadzie osłabienia promieniowania przechodzącego przez badany obiekt.

Pozwala to na wydobycie informacji o rozkładzie przestrzennym struktury badanej próbki. W celu zrozumienia zasady działania tomografów X należy zapoznać się z podstawowymi reakcjami zachodzącymi między padającą wiązką promieniowania a materią [15, 35]. Promieniowanie X przechodząc przez materię ulega osłabieniu, ułamek promieniowania jest „przechwytywany” przez rozpraszanie oraz absorpcję. Podstawowe równanie opisujące osłabienie wiązki promieniowania przechodzącej przez materiał określa prawo Beera–Lamberta [15, 35]:

$$N = N_0 \exp \left(- \int_{path} \mu(x, y) dx \right) \Rightarrow \ln \frac{N_0}{N_1} = \int_{path} \mu(x, y) dx \quad (4)$$

gdzie:

- N – liczba fotonów przetransmitowanych pojedynczą linią przez badaną próbkę,
- N_0 – liczba fotonów wyemitowanych przez źródło,
- $\mu(x, y)$ – wartość liniowego współczynnika osłabienia promieniowania w punkcie (x, y) .

Otrzymany rozkład liniowego współczynnika osłabiania promieniowania stanowi punkt wejściowy do analizy struktury próbki. Istotne jest zrozumienie, jaka informacja jest zachowana we wspomnianym współczynniku. W tym przypadku należy przeprowadzić dokładniejszą analizę interakcji promieniowania i badanej materii. W zależności od energii, jaką niosą ze sobą fotony promieniowania X, może wystąpić kilka zjawisk:

- absorpcja fotoelektryczna,
- rozpraszania koherentne i niekoherentne (efekt Comptona),
- zjawisko tworzenia się par.

Zjawiska te występują w pewnych zakresach energii promieniowania X. W zakresie 30...200 keV mają miejsce przede wszystkim dwa pierwsze zjawiska (na analizę zakresów energii ma dodatkowo wpływ skład próbki). Produkcja par uwidacznia się dla dużych energii ponad 1,022 MeV. Dla mniejszych wartości energii liniowy współczynnik osłabienia promieniowania μ zależy od liczby atomowej materii, gęstości badanego obiektu oraz energii samych fotonów. Empiryczne równanie pokazujące wpływ tych własności materiału na promieniowanie zostało zapisane relacją [9]:

$$\mu = 5\rho N_A 10^{-28} \left\{ 0,597 \exp[-0,028(E - 30)] + 1,25 \frac{Z_{ef}^{2,0}}{E^{1,9}} + 9,8 \frac{Z_{ef}^{3,8}}{E^{3,2}} \right\} \quad (5)$$

gdzie:

- N_A – liczba Avogadra,
- E – energia promieniowania,
- Z_{ef} – efektywna liczba atomowa próbki,
- ρ – gęstość materiału.

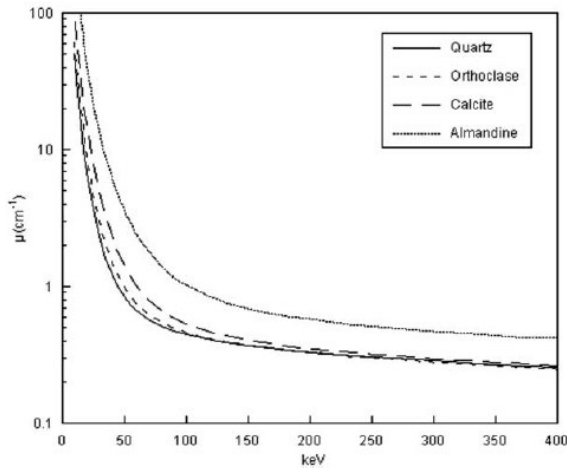
W reakcjach promieni X z materia, jak zostało powiedziane wcześniej, w zakresie energii do 200 keV dominują zazwyczaj dwa zjawiska: efekt fotoelektryczny oraz rozpraszanie Comptonowskie. W przypadku efektu Comptona, dominuje on dla wyższych energii promieniowania (opisany przez pierwszy czynnik w nawiasie we wzorze (5)), wpływ na współczynnik μ ma gęstość próbki materiału i energia promieniowania, natomiast w przypadku efektu fotoelektrycznego, dominującego dla mniejszych energii promieniowania, współczynnik μ zależy od struktury chemicznej materiału absorbującego (liczby atomowej) jak również energii promieniowania. W szczegółowej analizie wzoru (5) czynnik drugi (w nawiasie) odpowiada za rozpraszanie koherentne. Upraszczając zapis z wzoru (5) zależność współczynnika osłabiania promieniowania można zapisać za pomocą relacji:

$$\mu = \rho \cdot \left(a + b \frac{Z^{3,8}}{E^{3,2}} \right) \quad (6)$$

gdzie a, b – współczynniki zależne od energii widma.

Wpływ energii promieniowania na jakość obrazu i jego dalszą interpretację jest istotnym problemem. Obrazowanie próbki w zakresie zjawiska efektu fotoelektrycznego wymusza, w celu porównania dwóch obszarów badanego obiektu pod względem gęstości, stałą wartość liczby atomowej Z (ten sam element atomowy bądź ten sam skład). Pełne wyodrębnienie liczby atomowej oraz gęstości próbki z współczynnika osłabienia nie jest zadaniem prostym dla obrazowania przy pomocy niskich energii widma promieniowania. Natomiast w zakresie dominacji zjawiska Comptona, gdzie główny wpływ na współczynnik osłabiania promieniowania ma gęstość, wysoka energia fotonów i związane z tym faktem niskie wartości współczynnika mogą spowodować, że kontrast wewnątrz próbki będzie zbyt niski i obraz eksponować będzie mało wyraźne cechy struktury materiału.

Rysunek 3 pokazuje wpływ energii promieniowania na liniowy współczynnik osłabienia dla 4 przypadków minerałów skalnych (kwarc, ortoklaz, kalcyt oraz almandyn). Interesująca jest analiza porównawcza dwóch materiałów o podobnej gęstości – kwarcu ($\rho = 2,65 \text{ g/cm}^3$) oraz ortoklaz ($\rho = 2,59 \text{ g/cm}^3$) – przeprowadzona w pracy [25]. Dla niskiej energii promieniowania różnica między współczynnikami osłabienia przenikalności jest wyraźna dla tych materiałów. Wynika to z tego, że w tym zakresie energii znaczącą rolę odgrywa efekt fotoelektryczny i uwidacznia się wpływ liczby atomowej (a ta jest różna dla tych dwóch minerałów). Dla większych energii promieniowania wartość tych współczynników jest już bardzo podobna i ich rozróżnienia może być w tym zakresie energii bardzo utrudnione. Pokazuje to istotę doboru parametrów źródła promieniowania, w celu odróżnienia dwóch minerałów.



Rys. 3. Wykres liniowego współczynnika osłabienia promieniowania w funkcji energii promieniowania dla przykładowych minerałów skalnych [25]

4. Problemy przy obrazowaniu struktur badanych materiałów

Otrzymany obraz za pomocą systemów pomiarowych opartych na promieniowaniu X nie jest pozbawiony błędu związanego zarówno z pomiarem, jak i samą rekonstrukcją. Istnieją procedury, które minimalizują wpływ czynników generujących te błędy, a ich zastosowanie pozwala na polepszenie jakości obrazowania [1, 3, 34, 35, 39].

Jedno z pierwszych źródeł błędu dotyczy rodzaju widma jakie emituje źródło promieniowania. Problem ten dotyczy zależności współczynnika osłabiania od energii padającej wiązki promieniowania. Jeśli źródło wytwarza monochromatyczną wiązkę problem ten jest nieistotny, jednakże zazwyczaj widmo promieniowania przejawia charakter polichromatyczny. Trudność związana jest z faktem, że fotony wiązki X mają różną energię. Osłabienie wiązki spowodowane materiałem jest większe dla fotonów o niższej energii, przez co widmo wiązki zmienia się „twardnieje” (staje się bardziej penetrujące, przechodząc przez materiał). Problem ten nazywany jest w literaturze angielskiej jako *beam hardening*. Efektem są artefakty lub redukcja zrekonstruowanych współczynników osłabienia (który też jest zależny od wartości energii promieniowania) w kierunku środka obiektu w powstałym obrazie. W celu minimalizowania tego zjawiska stosowne jest kilka metod, które można podzielić na 3 grupy:

- 1) przetworzenie danych pomiarowych – projekcji – przed etapem rekonstrukcji;
- 2) przetworzenie zrekonstruowanych obrazów;
- 3) szczegółowa analiza zachodzącego zjawiska.

Często stosowane są również filtry w postaci folii metalowych nakładanych w miejscu wyjścia źródła promieniowania, eliminujących fotony o niższej energii z widma promieniowania.

Kolejnym problemem jest poziom sygnału docierającego do detektora (problem spotykany również w innych typach tomografów). Sygnał ten nie powinien osiągać zarówno górnej granicy jak dolnej zakresu procesu jego digitalizacji. Poziom sygnału powinien być tak dobrany, aby nie doprowadzać do nasycenie się detektora, a w przypadku dolnej granicy uniemożliwić pojawienie się szumu w obrazie.

Analizując wpływ różnych czynników na jakość uzyskanych wyników, należy również rozważyć zjawisko rozproszenia fotonów przez materiał. Osłabienie spowodowane rozpraszaniem fotonów związane jest z odchyleniem ich od pierwotnej ścieżki wiązki, powodując zwiększenie liczby fotonów na detektorze dla innego obszaru próbki. Najlepszym rozwiązaniem minimalizującym ten problem jest zastosowaniem detektorów z kolimatorem.

Odpowiednie użycie detektorów wiąże się jeszcze z kolejnym istotnym czynnikiem, sygnał dostarczony przez czułą komórkę detektora musi być liniowo rozłożony między poziom niski (brak padających fotonów) oraz poziom wysoki (fotony padają na detektor bez osłabienia wiązki w mierzonym polu – brak obiektu w polu pomiarowym). Odpowiednia korekcja – kalibracja systemu – pozwala na pozbycie się tzw. efektu pierścienia.

W celu eliminacji poszczególnych zakłóceń stosowana jest, podobnie jak dla np.: tomografii elektrycznej, procedura kalibracji systemu. W jej skład wchodzi pomiar sygnału na detektorze gdy źródło promieniowania jest wyłączone (*offset calibration*) oraz dla włączonego źródła bez próbki (*gain calibration*). Procedury normalizacji pomiarów na podstawie wspomnianych kalibracji mogą odbywać się w różny sposób. W klasycznym rozwiązaniu wartości dla kalibracji z brakiem promieniowania odejmowane są od uzyskanego obrazu – radiogramu. Dalej do korekcji uwzględniane są pomiary dla czynnego źródła promieniowania (kalibracja typu *gain calibration*). Celem jest doprowadzanie do sytuacji, gdzie każdy piksel otrzymuje tą samą ilość sygnału wejściowego z detektora. Ten stan rzeczy ujmuje się słowami obraz pola płaskiego (*flat-field image*). Poziom tego sygnału zazwyczaj dobierany jest tak, aby jego wartość była zbliżona do wartości sygnału dla próbki znajdującej się w obszarze pomiaru (w trakcie właściwego pomiaru). W przypadku detektorów liniowych wartość i -tego piksela dla sygnału wejściowego x jest dana przez równanie (7) poniżej:

$$y_i = a_i \cdot x \quad (7)$$

Określając dla uproszczenia poziom sygnału dla obrazu pola płaskiego x (FFI) jako równy 1 końcową wersję korekcji piksela można zapisać w postaci równania (8):

$$y'_i = \left(y_{sr}^{FFI} / y_i^{FFI} \right) \cdot y_i \quad (8)$$

gdzie:

y_{sr}^{FFI} – średnia wartość sygnału dla obrazów FFI,

y_i^{FFI} – wartość sygnału w punkcie i -tym dla obrazu FFI.

Ten typ korekcji jest stosowany dla liniowych detektorów, w przypadku detektorów o nieliniowej odpowiedzi na sygnał wejściowy stosowane są metody bardziej zaawansowane choćby oparte na aproksymacji odpowiedzi detektora wielomianem n -tego stopnia. Zasada postępowania jest podobna, ale konieczne jest użycie dwóch lub więcej obrazów FFI

(obrazów dla różnego natężenia sygnału wejściowego detektora). Oczywiście jakość obrazu przy zastosowaniu aproksymacji wielomianem n -tego stopnia jest większa niż to ma miejsce dla liniowego podejścia [1].

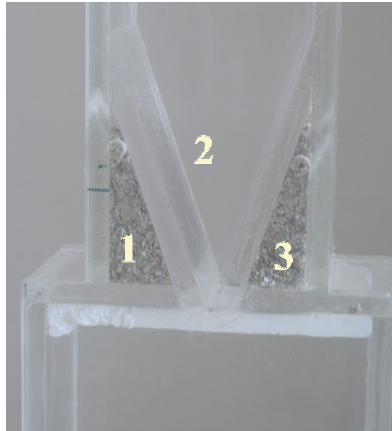
W przypadku korekcji pikseli na obrazie wynikowym używane są podobne metody jakie możemy spotkać w technikach przetwarzania i analizy obrazów z kamery CCD. Stosowane są filtry medianowe czy uśredniające, mające wyeliminować pojedyncze piksele, odbiegające wartością od swoich sąsiadów. Możliwe jest również zastosowanie technik progowania, interpolacji pikseli w określonym kierunku czy technikę gradientu obrazu w celu eliminacji defektów zbioru pikseli dla wynikowego obrazu [22].

5. Opis ustawień układu pomiarowego tomografu promieni X

Do pomiarów zastosowany został system firmy Phoenix v|tome|x przedstawiony na rysunku 1. System ten charakteryzuje możliwość pracy źródła promieniowania w zakresie do 240 kV oraz stała odległości między źródłem a detektorem 0,5776 m. Detektor zbudowany jest z matrycy 1920×1500 pikseli o rozmiarze 127×127 μm każdy. Dodatkowo w celu zmniejszenia czasu akwizycji detektor umożliwia pracę w systemie tzw. *binning mode* – przy zwiększonym rozmiarze elementu detekcji (piksela dwukrotnie – 254×254 μm). Praktyczny rozmiar woksela na trójwymiarowym obrazie wynikowym mieści się w zakresie <1,5, 160> [μm], w zależności od położenia próbki między źródłem a detektorem. W celu przeprowadzenia pomiarów porowatości materiału sypkiego (piasku) w prostokątnym modelu silosu ustawione zostały następujące parametry systemu:

- Parametry geometryczne:
 - odległość FOD (focus -object - distance) = 341,10 mm,
 - odległość FDD (focus-detector-distance) = 577,60 mm,
 - powiększenie 1,69.
- Parametry detektora:
 - liczba projekcji 720,
 - kąt rotacji obiektu 360,00 deg,
 - czas pomiaru jednej projekcji 200 ms,
 - liczba pomiarów do uśrednienia 2,
 - liczba pomiarów kalibracyjnych 50,
 - rozmiar piksela $X = 0,254 \mu\text{m}$, $Y = 0,254 \mu\text{m}$,
 - liczba pikseli $X = 960$, $Y = 768$.
- Parametry źródła:
 - napięcie 145 keV,
 - prąd 110 uA.
- Parametry danych obrazu 3D:
 - liczba wokseli $Y = 700$, $X = 800$, $Z = 350$,
 - rozmiar woksela 0,15 mm,
 - zakres wartości <0, 655535>.

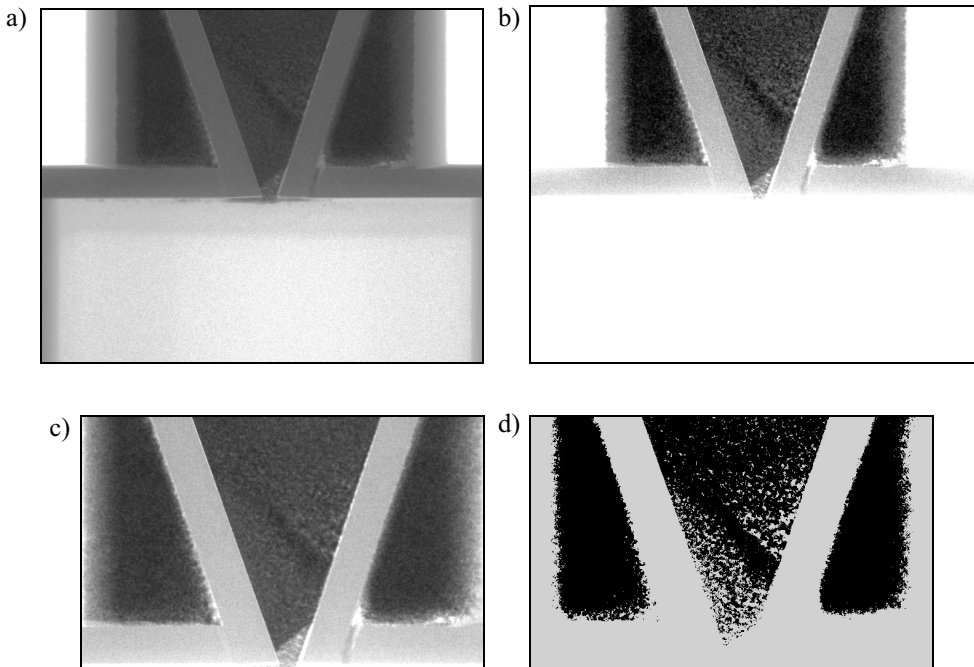
Wstępne pomiary porowatości zostały przeprowadzone na obiekcie statycznym (silos) z napełnionym częściowo piaskiem. Piasek o różnej stopniu upakowania znajdował się w trzech częściach silosu (rys. 4), część 1 oraz 3 piasek ulokowany wewnątrz struktury silosu przez otwory wywiercony z boku zbiornika – piasek zagęszczony. Do obszaru 2 piasek był nasypywany z góry silosu przez lej – piasek luźno usypany.



Rys. 4. Silos użyty w pomiarach: 1, 2, 3 – oznaczenie stref o różnym poziomie upakowania piasku

6. Wyniki

W pierwszym etapie prac badawczych analizę upakowania piasku w zbiorniku dokonano za pomocą obrazów 2D uzyskanych bezpośrednio z detektora – radiogramów. Każdy z pikseli obrazu obrazuje osłabienie wiązki promieniowania X przechodzącej przez nieruchomy obiekt. Promieniowanie napotyka na ścieżce pomiarowej poszczególne struktury materiału, które mają wpływ na wartość odczytaną z detektora. Na rysunku 5a pokazany został obraz projekcji – radiogram (dwuwymiarowy obraz z detektora), dla pierwszego położenia obiektu w obszarze pomiarowym. Wartości pikseli zostały sprowadzone do przedziału $\langle 0, 255 \rangle$. Szczególnie istotny wpływ na analizę radiogramu stanowią rozmycia przy bocznych ścianach silosu, gdzie widzimy wpływ ścian bocznych na wartości pikseli w tym obszarze (rozjaśniony obszar). Po pierwszym przekształceniu – wyrównanie histogramu – obrazu źródłowego (rys. 5b) ściany boczne zostały wyeliminowane z dalszej analizy, jednakże ich wpływ na obszar przyścienny pozostał. Powiększenie obszaru pomiarowego silosu zostało pokazane na rysunku 5c. Kolejny etap to progowanie obrazu w celu wyznaczenia wartości porowatości materiału sypkiego w 3 strefach silosu (rys. 5d). Przetwarzanie obrazów dokonywane zostały za pomocą oprogramowania *ImageJ* (próg został dobrany automatycznie na poziomie wartości 126).



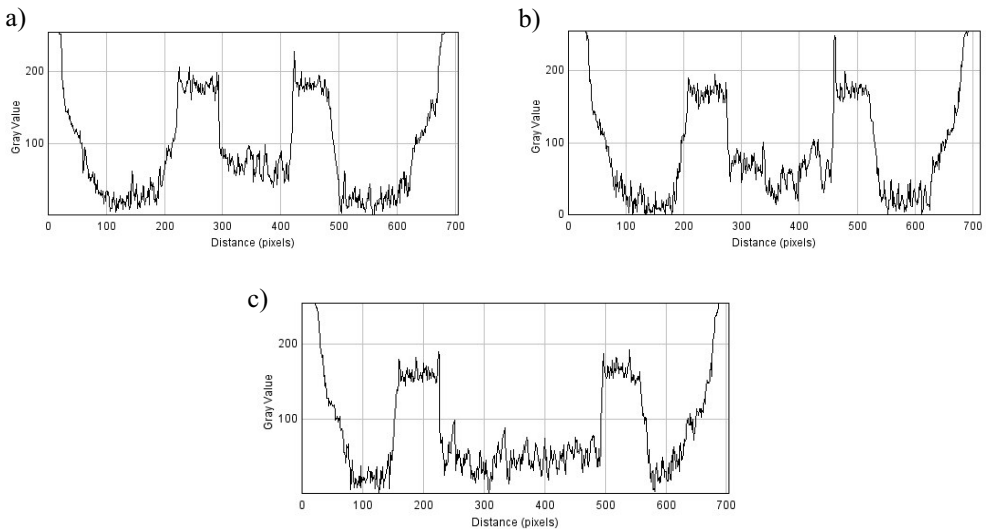
Rys. 5. Obraz pikseli detektora: a) obraz źródłowy; b) obraz po korekcji; c) powiększenie badanego obszaru; d) wynik progowania obrazu radiogramu

Analiza ilościowa przetworzonego radiogramu (wyznaczenie liczby pikseli zajętych przez powietrze – mniejsza wartość pikseli na obrazie progowanym) z rysunku 5d wskazała obszar środkowy jako obszar o największej porowatości 32,37%, pozostałe strefy silosu charakteryzowały się porowatością na poziomie 16,45% oraz 21,00%. Porowatość stref była wyznaczana poprzez zaznaczenie obszaru pikseli podlegających obliczeniom (tab. 1). Z uwagi na rozmycie obrazu przy ścianach bocznych proces ten nie był zoptymalizowany.

Na wykresach (rys. 6) pokazane zostały zmiany wartości pikseli wzdłuż linii położonych w dolnym fragmencie analizowanego obszaru (a), środkowym (b) oraz górnym (c).

Tabela 1
Wyniki analizy obrazów radiogramów tomografu promieni X

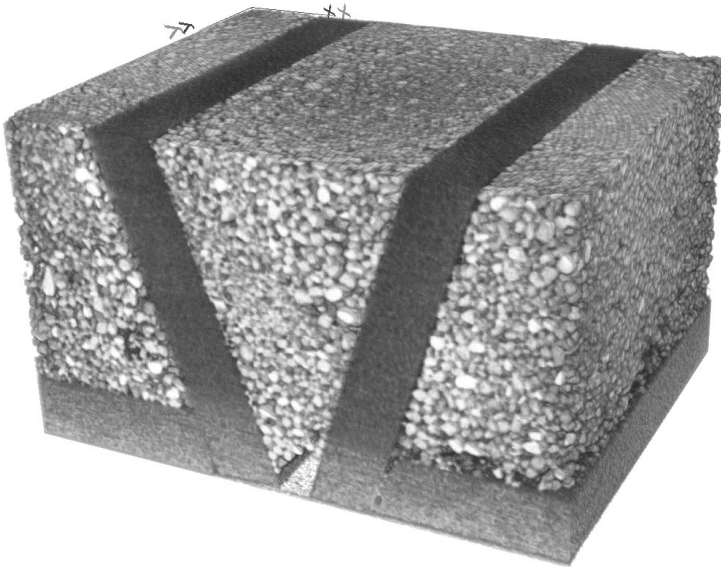
Strefa silosu	Średnia	Odchylenie standardowe	Obszar okupowany przez pory [%]
1	53,54	103,86	22,05
2	82,53	119,31	32,37
3	41,94	94,53	20,45



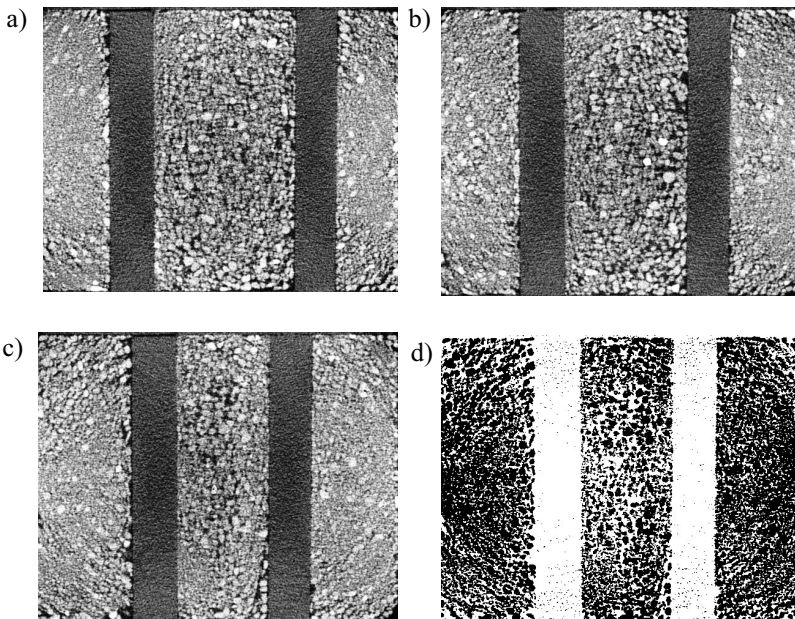
Rys. 6. Wykresy zmian współczynnika osłabienia promieniowania dla różnych położenia linii pikseli przecinających radiogram: a) linia położona w dolnej części obrazowanej strefy silosu; b) linia położona w środkowej części obrazowanej strefy silosu; c) linia położona w górnej części obrazowanej strefy silosu

Ujawniły się tu również różnice w porowatości piasku w 3 badanych strefach. Najmniejsza różnica między trzema strefami pojawia się w najwyższej warstwie piasku. Różnica między strefą 3 a obszarami granicznymi (obszarami pleksi) jest bardzo wyraźna, ale już w przypadku granic między bocznymi ścianami a obszarem 1 oraz 3 zmiana wartości pikseli jest łagodna – nie występuje tu duży gradient zmian wartości pikseli. Rozmycie obrazu detektora na granicy tych stref (rys. 5a) spowodowane jest biegiem wiązki promieniowania X. Wiązka promieniowania pada na granicę obszaru bocznych ścian silosu i zalegającego przy nich materiału pod pewnym kątem (kąt jest większy niż to jest w przypadku centralnie położonej strefy 3 silosu). Sygnał odebrany na detektorze niesie ze sobą informację o osłabieniu promieniowania, uśredniając jego wartość z całej pokonanej drogi przez badany obiekt. W obszarze bocznej ścianie silosu na wartość tą ma wpływ obecność piasku oraz pleksi (z której zbudowany jest silos), która to nienaturalnie obniża wartość wyznaczanego przez radiogram współczynnika osłabiania.

Ostatnim etapem analizy była rekonstrukcja obrazu 3D oraz jego wizualizacja i analiza. Na rysunku 7 przedstawiony został uzyskany trójwymiarowy obraz struktury materiału znajdującej się w silosie. Obraz składał się z $700 \times 800 \times 350$ pikseli (dla osi XYZ). Dla uzyskanego obrazu dokonana została analiza porowatości piasku dla różnych wysokości jego położenia (w osi OZ). Rysunek 8 pokazuje rozkład ziaren dla różnych wysokości warstw piasku w formie przekrojów poprzecznych obrazu 3D (przekroju nr 50, 110 oraz 175 – liczba jest wartością zmiennej Z i oznacza położenie licząc od góry obszaru analizy).



Rys. 7. Zrekonstruowany obraz trójwymiarowy silosu wypełnionego piaskiem (zaprezentowany został tylko obszar podlegający dalszej analizie)



Rys. 8. Przekroje obrazu 3D: a) przekrój 50; b) przekrój 110; c) przekrój 175; d) przykład progowania dla obrazu przekroju 175

Przeprowadzona analiza porowatości dla różnych wysokości zalegania piasku oparta była, podobnie jak to miało miejsce w przypadku analizy danych 2D, o progowanie obrazów (rys. 8d) oraz zliczanie pikseli zajętych przez powietrze (tab. 2).

Tabela 2

Wyniki analizy obrazów trójwymiarowych pochodzących z tomografu promieni X

Obszar	Obraz nr 50		Obraz nr 110		Obraz nr 175	
	woksele	[%]	woksele	[%]	woksele	[%]
1	37494	25,02	41093	29,10	46861	31,07
2	58671	42,19	47148	43,28	37098	43,57
3	31422	26,01	37599	26,86	44483	28,06

7. Wnioski

Zaprezentowane wyniki pomiaru porowatości materiału sypkiego w zamkniętej przestrzeni pokazują duże możliwości rozwoju metod przetwarzania i analizy zarówno radiogramów (obrazów 2D), jak i trójwymiarowych zrekonstruowanych obrazów tomograficznych. Porównując wyniki z analizy radiogramów i obrazów tomograficznych, należy zauważyć bliższe spodziewanym (teoretycznym) rezultatom wyniki z analizy obrazów 3D. Przewaga tego typu danych bierze się stąd, iż wynikowy obraz powstaje z kilkuset projekcji (radiogramów), a dodatkowo zastosowane korekcje (w trakcie procesu rekonstrukcji) eliminują rozmycie przy brzegach silosu, co jest kluczowe dla przeprowadzonej analizy. W przypadku badań dynamicznych procesów rozładowywania silosu konieczne stanie się użycie do analizy radiogramów, ze względu na czas pomiaru. W tym celu należy zastosować bardziej zaawansowane techniki przetwarzania obrazów 2D w celu eliminacji artefaktów w obrazie przed ich analizą. Nowopowstałe algorytmy przetwarzania i analizy radiogramów w przyszłych pracach będzie można zweryfikować na statycznych obiektach z różnym stopniem upakowania i rozkładu materiału sypkiego. Do porównania użyty zostanie obraz tomograficzny 3D powstały poprzez klasyczną rotację obiektu w przestrzeni pomiarowej.

Podziękowania

Badania zostały sfinansowane ze środków międzynarodowego projektu pt. „Development of Excellence in Non-Invasive Diagnostic System for Industrials and Scientific Applications” prowadzonego w ramach 6. PR - Mobility - Marie Curie Host Fellowships for the Transfer of Knowledge na podstawie kontraktu zawartego z Commission of the European Communities – Research Directorate-General o nr MTKD-CT-2006-039546.

Literatura

- [1] Aach T., Metzler V.H., *Defect interpolation in digital radiography: how object-oriented transform coding helps*. Proc. SPIE, vol. 4322, 2001.
- [2] Babout L., Maire E. Fougères R., *Damage initiation in model metallic materials: X-ray tomography and modeling*. Acta Materialia, vol. 52, 2004, 2475–2487.
- [3] Baruchel J., Buffière J.-Y., Maire E., Merle P., Peix G., *X-ray Tomography in Material Science*. Hermes, Paris, 2000, 204.
- [4] Beck M.S., Plaskowski A., *Cross Correlation Flowmeters: Their Application and Design*. Adam Hilger, Bristol, 1987.
- [5] Benuzzi-Mounaix A., Loupias B., Koenig M., Ravasio A., Ozaki N., Rabec le Gloahec M., Vinci T., Aglitskiy Y., Faenov A., Pikuz T., Boehly T., *Density measurement of low-Z shocked material from monochromatic x-ray two-dimensional images*. Physical Review, vol. 77 (2), issue 4, 2008.
- [6] Buffière J.-Y., Cloetens P., Ludwig W., Maire E., Salvo L., *In Situ X-Ray Tomography Studies of Microstructural Evolution Combined with 3D Modeling*. MRS Bulletin, vol. 33, 2008, 611–619.
- [7] Caulkin R., X. Jia, C. Xu M. Fairweather R.A., Williams H., Stitt M., Nijemeisland S., Aferka M., Crine A., Le'onard, Toye D., Marchot P., *Simulations of Structures in Packed Columns and Validation by X-ray Tomography*. Ind. Eng. Chem. Res. 2009, 48, 2009, 202–213.
- [8] Cloetens P., Pateyron-salome M., Buffière J.-Y., Peix G., Baruchel J., Peyrin F., Schlenker M., *Observation of microstructure and damage in materials by phase sensitive radiography and tomography*. J. Appl. Phys., vol. 81, No. 9, 1997, 5878–5886.
- [9] Dului O.G., *Computer axial tomography in geosciences: an overview*. Earth-Science Reviews, 48, 1999, 265–281.
- [10] Dyakowski T., Jeanmeure L.F.C., Jaworski A.J., *Applications of electrical resistance tomography for gas-liquid and liquid-solids flows – a review*. Powder Technology, vol. 112, 2000, 174–192.
- [11] Feser M., Gelb J., Chang H., Cui H., Duewer F., Lau S.H., Tkachuk A., Yun W., *Sub-micron resolution CT for failure analysis and process development*. Meas. Sci. Technol., 19, 2008.
- [12] Fischer F., Hoppel D., Schleicher E., Mattausch G., Flaske H., Bartel R., Hampel U., *An ultra fast electron beam x-ray tomography scanner*. Meas. Sci. Technol., 19, 2008.
- [13] Fu X., Dutt M., Benthall A.C., Hancock B.C., Cameron R.E., Elliott J.A., *Investigation of particle packing in model pharmaceutical powders using X-ray microtomography and discrete element method*. Powder Technology, 167, 2006, 134–140.
- [14] Grassler T., Wirth K.-E., *X-ray Computed Tomography in Mechanical Engineering – A Non-intrusive technique to Characterize Vertical Multiphase Flows*. Proc. Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology, Berlin, Germany, 1999, 203–219.
- [15] Hale J., *The fundamentals of radiological science*. Thomas, Springfield, Ill., 1974.
- [16] Halmshaw R., *The effect of focal spot size in industrial radiography*. British Journal of NDT, vol. 34, No. 8, 1992, 389–394.
- [17] Hampel U., Fischer F., Bieberle M., Schleicher E., *Recent progress in ultra fast electron beam X-ray computed tomography*. 5th International Symposium on Process Tomography in Poland, Zakopane, 2008.
- [18] Hampel U., Speck M., Koch D., Menz H.-J., Mayer H.-G., Fietz J., Hoppe D., Schleicher E., Zippe C., Prasser H.-M., *Ultrafast X-ray computed tomography with a linearly scanned electron beam source*. Flow Measurement and Instrumentation, vol. 16, 2005, 65–72.
- [19] Herman G.T., *Image reconstruction from projections: the fundamentals of computerized tomography*. Academic Press, New York, NY, 1980.
- [20] Hiriyannaiah H.P., *X-ray Computed Tomography for Medical Imaging*. IEEE Signal Processing Magazine, 42–59.

- [21] Hoyle B.S., Jia X., Podd F.J.W., Schlaberg H.I., Wang M., West R.M., Williams R.A., York T., *Design and application of a multi-modal process tomography system*. Meas. Sci. Technol., 12, 2001, 1157–1165.
- [22] <http://www.phoenix-xray.com/en/index.php>, <http://www.skyscan.be/home.htm>, <http://www.xtekxray.com/>, <http://www.xradia.com>.
- [23] Huang S.M., Xie C.G., Salkeld J.A., Plaskowski A., Thorn R., Williams R., Hunt A. i Beck M.S., *Process tomography for identification, design, and measurement in industrial systems*. Powder Technology, 69, 1992, 85–92.
- [24] Jia X., Williams R.A., *A packing algorithm for particles of arbitrary shapes*. Powder Technology 120, 2001, 175–186.
- [25] Kak A.C., Slaney M., *Principles of Computerized Tomographic Imaging*. Piscataway, NJ: IEEE, 1988, 49–112.
- [26] Ketcham R.A., Carlson W.D., *Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences*. Computers & Geosciences, 27, 2001, 381–400.
- [27] Lewitt R.M., *Reconstruction algorithms : transform methods*. Proceedings of the IEEE, vol. 71, No 3, 1983, 390–408.
- [28] Maire E., Carmona V., Courbon J., Ludwig W., *Fast X-ray tomography and acoustic emission study of damage in metals during continuous tensile tests*. Acta Materialia, vol. 55, 2007, 6806–6815.
- [29] Maire E., Adrien J., Vincent C., Buffière J.-Y., Courbon J., *In situ experiments in X ray tomography using synchrotron and standard laboratory tomographs*. 5th International Symposium on Process Tomography in Poland, Zakopane, 2008.
- [30] Nattierer F., *Numerical methods in tomography*. Acta-Numerica, vol. 8, 1999, 107–41.
- [31] Płaskowski A., Beck M.S., Thorn R, Dyakowski T., *Imaging Industrial Flows*. IOP Publishing, Bristol, 1995.
- [32] Reinecke N., Mewes D., *Recent developments and industrial research applications of capacitance tomography*. Meas. Sci. Technol., vol. 7, 1996, 325–37.
- [33] Scott D.M., McCann H., *Process Imaging for automatic control*. Taylor and Francis Group, 2005, 439.
- [34] Stock S.R., *X-ray microtomography of materials*. International Materials Reviews, 44, 1999, 141–164.
- [35] TerPogossian M., *The Physical Aspects of Diagnostic Radiology*. Harper and Row, New York, NY, 1967.
- [36] Toyokawa H., *Industrial imaging method using high-energy photon beam CT*. 3rd International Workshop on Process Tomography (IWPT-3), Tokyo, Japan, 2009, 1–7.
- [37] Williams R.A., Beck M.S. eds., *Process Tomography – Principles, Techniques and Applications*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1995, 507.
- [38] Williams R.A., Jia X., *Tomographic imaging of particulate system*. Advanced Powder Technology, 14, 2003, 1–16.
- [39] Xu F., Liu H., Wang G., Alford B.A., *Comparison of adaptive linear interpolation and conventional linear interpolation for digital radiography systems*. Journal of Electronic Imaging, 9(1), 2000, 22–31.