

Zbigniew Chaniecki*, **Krzysztof Grudzień****, **Dominik Sankowski*****

Politechnika Łódzka

Wyższa Szkoła Kultury Społecznej i Medialnej w Toruniu

WIZUALIZACJA DANYCH TOMOGRAFICZNYCH W DIAGNOSTYCE PROCESÓW PRZEMYSŁOWYCH

Wprowadzenie

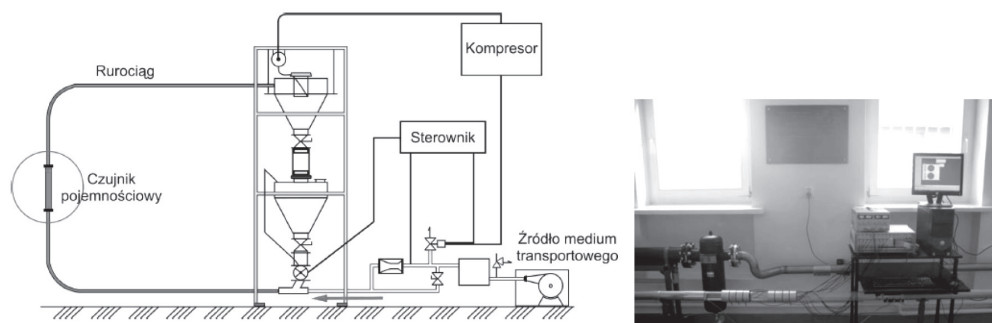
Tomografia w zastosowaniach przemysłowych jest nauką stosunkowo młodą. Początki datowane są na lata pięćdziesiąte dwudziestego wieku dla metod radiacyjnych i osiemdziesiątych dla metod elektrycznych [zob. też: Grudzień i in. 2015]. Technologia ta jest wciąż niepopularna, głównie ze względu na wysoką cenę, kłopotliwe przemieszczanie czujników i sprzętu pomiarowego, trudności w uzyskiwaniu szybkiej i wysokiej jakości obrazów – wizualizacji (ang. *visualization* lub *imaging*).

* **Zbigniew Chaniecki** – doktor nauk technicznych w dziedzinie informatyki, specjalność: tomografia procesowa, WEEIA PŁ (2006). Adiunkt Instytutu Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej, wykładowca Instytutu Informatyki WSKSiM. Zajmuje się przemysłowymi systemami kontrolno-pomiarowymi oraz ich sterowaniem, diagnostyką i monitorowaniem procesów transportu materiałów sypkich, bezprzewodowymi metodami transmisji danych, przetwarzaniem i analizą dużych zbiorów (ang. *big data analysis*) i strumieni surowych danych (ang. *raw data*), zagadnieniami e-kształcenia, przetwarzaniem bez granic, automatyką i robotyką.

** **Krzysztof Grudzień** – doktor nauk technicznych w dziedzinie informatyki, specjalność: tomografia procesowa, WEEIA PŁ (2007). Adiunkt Instytutu Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej, wykładowca Instytutu Informatyki WSKSiM. Zajmuje się zastosowaniami bezinwazyjnych technik obrazowania i identyfikacji parametrów dynamicznych procesów przemysłowych, bezprzewodowymi metodami transmisji danych, przetwarzaniem i analizą dużych zbiorów (ang. *big data analysis*) i strumieni surowych danych (ang. *raw data*), zagadnieniami e-kształcenia, przetwarzaniem bez granic.

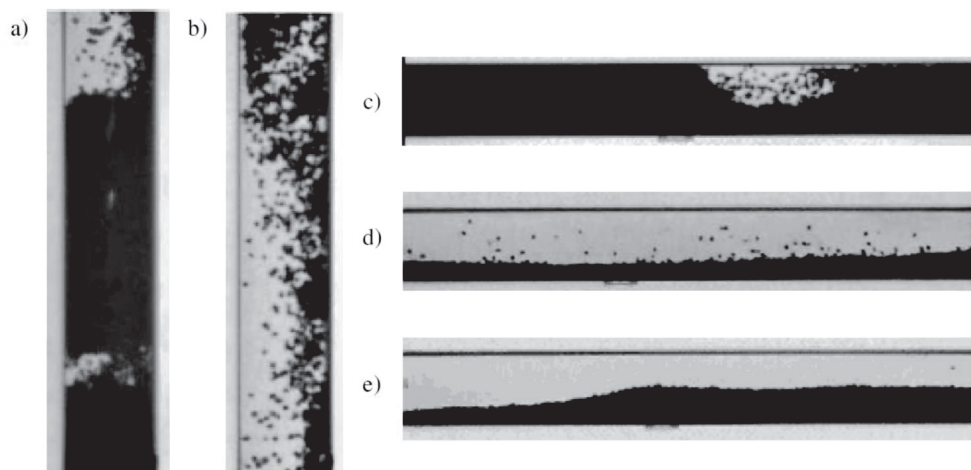
*** **Dominik Sankowski** – profesor zwyczajny doktor habilitowany. Od 1995 r. pełni funkcję kierownika (dyrektora) Katedry Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej (przekształconej w 2012 r. w Instytut Informatyki Stosowanej), którą od podstaw zorganizował. Pomysłodawca i współtwórca Łódzkiej Szkoły Tomografii Procesowej. Wielokrotny koordynator i kierownik grantów krajowych i zagranicznych w projektach badawczych KBN i projektach UE. Członek Rady Naukowej Wyższej Szkoły Kultury Społecznej i Medialnej w Toruniu. Doktor honoris causa Państwowej Akademii Finansów we Lwowie. Zajmuje się analizą i przetwarzaniem obrazów, rozpoznawaniem obrazów, systemami inteligentnymi, inżynierią oprogramowania, przetwarzaniem danych, systemami czasu rzeczywistego, systemami informatycznymi w zarządzaniu, identyfikacją online obiektów przemysłowych oraz automatyzacją procesów cieplnych.

Charakterystycznym przykładem zastosowań przemysłowych jest składowanie i transport materiałów sypkich, zwłaszcza granulatu plastikowego (rys. 1). Ten rodzaj materiału stanowi największy udział we współczesnej produkcji opakowań, obudów i przedmiotów użytkowych, produkowanych metodą wtryskiwania w formy.



Rys. 1. Schemat i zdjęcie fragmentu odcinka poziomego rurociągu półprzemysłowej instalacji transportu pneumatycznego i składowania materiałów sypkich w Instytucie Informatyki Stosowanej PŁ (zespół tomoKIS)

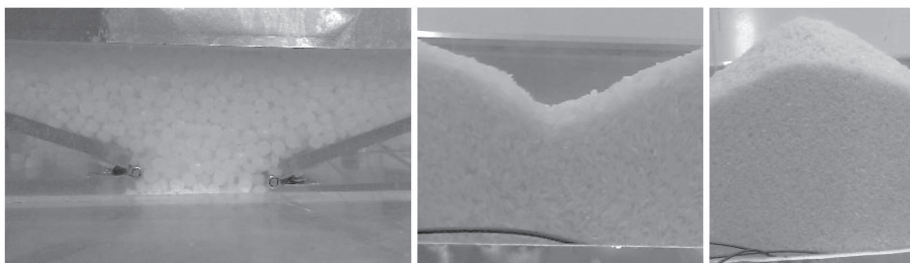
W przypadku gdy materiał jest transportowany pneumatycznie, odbywa się to w rurociągach często o bardzo dużej długości, przebiegających przez wiele pomieszczeń. W większości przypadków przepływ substancji regulowany jest prędkością schładzanego powietrza tłoczonego przez systemy dmuchaw. Zbyt mała prędkość powoduje, że na odcinkach pionowych materiał nie może pokonać sił grawitacji i opada, co skutkuje powstawaniem zatorów i blokowaniem rurociągu w miejscu przejścia odcinka poziomego w pionowy – rys. 2 a), zaś w poziomych odcinkach mogą powstawać stacjonarne złoża i blokować przepływ – rys. 2 e). Blokada przyczynia się do znacznych strat finansowych na skutek przestoju, przerwy w ciągłości produkcji i zniszczeń powodujących zastyganie lub palenie systemów topienia plastiku. Zbyt duża prędkość powietrza może być natomiast powodem niszczenia materiału oraz wywoływać niekorzystne zjawiska elektrostatyczne. Prawidłowe prowadzenie procesu produkcyjnego wymaga ciągłego monitorowania i diagnostyki w celu zapewnienia ciągłości produkcji i ekonomicznych parametrów procesu pod względem zasilania i zużycia materiału. Dodatkowo transportowany materiał może wprowadzać efekty dynamiczne niszczące konstrukcje instalacji [Niedostatkieicz, 2003].



Rys. 2. Zdjęcia pokazujące charakterystyczne typy przepływów procesu transportu pneumatycznego: a) materiał poruszający się w górę (ang. plugs); b) opadający – możliwe blokowanie rurociągu w przypadku nieodpowiednich nastaw systemu; c) materiał poruszający się w poziomie (ang. slugs); d) przepływ dwufazowy – zjawisko przesuwania się wierzchniej warstwy granulatu po stacjonarnym podłożu; e) materiał zalegający w dolnej części rury – możliwe blokowanie rurociągu w przypadku nieodpowiednich nastaw systemu. Wykonano przy użyciu superszybkiej kamery NAC 500 w Institute of Science and Technology, University of Manchester [Jaworski i Dyakowski, 2002 – zamieszczono za zgodą Autorów]

Mimo iż pracę rurociągu nadzoruje system tomograficzny, zdjęcia na rys. 2 wykonano przy użyciu superszybkiej kamery. Kamery i aparaty fotograficzne, które ze względu na swoją nieinwazyjność chętnie wykorzystywane są w przemyśle, wspomagają tomografię w procesie diagnostycznym, utrwalającym zwizualizowany obraz obiektu, gdy ściany obudowy są przezroczyste (rys. 2). W zgodzie z taką definicją metody wizualizacji oparte na obrazie z kamery CCD można zaliczyć do tomograficznych technik optycznych [Płaskowski i in., 1995; Williams i Beck, 1995; Scott i McCann, 2005], z uwzględnieniem ograniczeń do warstw zewnętrznych nieprzezroczystego wnętrza. Zdjęcia przydatne są do wykrycia defektu lub późniejszych porównań. Analiza zdjęć jest szczególnie pomocna, gdy badany obszar znajduje się poza zasięgiem czujników pomiarowych (rys. 3). Więcej na ten temat znajdzie Czytelnik w artykule tego samego numeru „Fides, Ratio et Patria” [Grudzień i in., 2015].

Rozwiązaniem może być użycie tomografu procesowego do monitorowania i diagnostyki stanu procesu wspomagającego system sterowania w doborze optymalnej prędkości powietrza czy utrzymywania prawidłowych parametrów otworu wylotowego i nachylenia ścian leja w zbiornikach, silosach przechowywających materiał sytki, podczas opróżniania grawitacyjnego.



Rys. 3. Zdjęcie procesu wypływu granulatu plastikowego w sekcji przezroczystej zbiornika magazynowego [zdjęcia własne autorów artykułu wykonane podczas osobiście prowadzonych badań]

Ze względu na dielektryczne właściwości większości materiałów sypkich najlepszą do pomiaru są metody tomografii elektrycznej, zwłaszcza pojemnościowej ECT (ang. *electrical capacitance tomography*) [Płaskowski i in., 1995; Chaniecki, 2006]. Tomografia elektryczna bazuje na wykorzystaniu pomiaru cech pola elektrycznego, które ze względu na swój „miękki” charakter w przypadku napotkania substancji o wyższym parametrze elektrycznym wybiera drogę „łatwiejszą”, przez co powoduje załamывanie linii pola, co utrudnia analizę wyników. Z uwagi na opisaną właściwość metody elektryczne nazywane są metodami miękkiego pola (ang. *soft field*).

Diagnostyka procesów przemysłowych [Korbicz i in., 2002], z użyciem metod tomograficznych jest jednym z najnowocześniejszych sposobów utrzymania ruchu linii produkcyjnych [Chaniecki i Sankowski, 2007].

Wizualizacja – pojęcia ogólne

Ze względu na nietypowy i nieznany charakter zagadnień z przemysłu dla wielu Czytelników w celu lepszego zrozumienia omawianych zagadnień pragniemy podać kilka informacji wprowadzających w samą *diagnostykę procesów przemysłowych* i *tomografię*. Umieszczamy je na tle przykładów z życia codziennego i medycyny, które są w zasadzie jasne dla każdego Czytelnika. Samo zaś wyprowadzenie znaczenia pojęcia „wizualizacja” (ang. *visualization* lub *imaging*) omówimy pod kątem metody pozyskiwania obrazowanych *danych* [łac. *notitia* to jednocześnie dane, ale i wiedza (!), ang. *Data*], zastosowania i potrzeb, które spowodowały ich użycie.

Typowym podejściem do zagadnienia wizualizacji zachodzących wokół nas zjawisk jest przetworzenie pomierzonych danych w *obraz*, (łac. *pictura*, ang. *image*) wiernie pokazujący dany obiekt, tzn. w najlepszy dla ludzkiego oka sposób. Jak pokazano na rys. 2 i 3 zastosowanie zdjęć pomaga łatwiej zrozumieć i opisać dane zjawisko. Wiąże się to z naturalnym przystosowaniem człowieka do odbierania

bodźców wzrokowych, tak aby wyrobić obie poglądy, wizję, wyobrażenie na temat obserwowanego zjawiska, stworzyć w umyśle koncepcję danego zagadnienia i na koniec uzyskać całościowy opis obserwowanego przedmiotu lub istoty żywej. Jednak oznaczałoby to, że osoba niewidząca nie mogłaby wyobrazić sobie zjawiska, którego nie widzi. Jest jednak inaczej. Wynika to z faktu, że wiedzę można pozyskać na podstawie nie tylko obrazu, ale każdej informacji, sygnału czy percepcji dotykowej. Tym samym torem podąża wizualizacja i wnioskowanie stosowane w tomografii przemysłowej. Źródłem informacji są dane – wiedza o otoczeniu.

Dane te pozyskuje się za pomocą różnego rodzaju narzędzi *pomiarowo-akwizycyjnych* („pomiar” z łac. *mensura*, z ang. *measurement*; ang. *data acquisition*), zbierających je w specyficzny dla siebie sposób. W tym znaczeniu słowo „pomiar” – rozumiane jako ustalenie wartości pewnej wielkości fizycznej, może nie być wprost identyfikowane z tak rozumianym procesem wizualizacji, jednak tak właśnie jest. Otóż do tego rodzaju pomiarów używa się *czujników pomiarowych* (ang. *sensor*). Najkorzystniejszym dla każdego zastosowania są *czujniki nieinwazyjne*, czyli takie, które nie wymagają ingerencji w badany obiekt – tkankę żywą, obudowę, przepływ. Dla przykładu: podstawowym czujnikiem nieinwazyjnym – znanym i powszechnie stosowanym, jest aparat fotograficzny, zwłaszcza wykonany w technologii cyfrowej. Tak zwane zrobienie zdjęcia polega na zmierzeniu padającego przez obiektyw światła odbitego od obiektu i przetworzeniu go na *sygnał elektryczny*, proporcjonalny do ilości padającego światła, w umieszczonych w płaszczyźnie matrycy (przetwornika) *elementach światłoczułych* czujnika (komórkach, z ang. *cells*), zebranie ich i złożenie zarejestrowanego obrazu bezpośrednio w pamięci aparatu w postaci RAW, a ściślej *raw data* (z ang. *surowe*, czyli *nieprzetworzone dane*), lub z *kompresją*, np. JPEG. Od liczby komórek na cal długości *ppi* (ang. *pixels per inch*) zależy dokładność odwzorowania obrazu, jego *jakość* (ang. *quality*). Obecnie obserwuje się niezwykle wysiłek w zwiększaniu liczby *pikseli* (ang. *pixels*) – odwzorowywanych przed dane zebrane w odpowiadających im położeniu komórek pomiarowych. Proces zwiększania liczby elementów światłoczułych jest szczególnie zauważalny w aparatach amatorskich. Do tego niestety jakość uzyskanego obrazu zależy nie tylko od liczby komórek światłoczułych przekładanych na *rozdzielczość* obrazu (ang. *resolution*), ale przede wszystkim od jakości tych komórek – zagęszczanych na tej samej powierzchni matrycy, oraz optyki aparatu fotograficznego; jest to przyczyną licznych niepotrzebnych dyskusji o jakości obrazu w urządzeniach o identycznych parametrach; szkoda, że jedynie liczbowo. W tym przypadku nie stosuje się w zasadzie żadnych kryteriów porównawczych, na które może powołać się użytkownik. Ponadto wysoka rozdzielczość obrazów, generująca sporej wielkości pliki, nie zawsze idzie w parze z potrzebami odbiorcy, tzn. z wyświetlaniem czy drukowaniem, ale na pewno prowadzi do „zapychania” cennej przestrzeni dyskowej. Te same trudności

generuje przetwarzanie danych tomograficznych. Zagadnienia analizy ogromnych zbiorów danych znane są pod anglojęzycznym pojęciem big data. Zdjęcie *wyświetlane* na ekranie monitora (ang. *display, view*) nie wymaga bowiem tak wysokich rozdzielczości, ponieważ jego jakość zależy od rozdzielczości urządzenia docelowego i wymiarów *wyświetlacza* (ang. *display*). W przypadku wydruku zaś ważna jest *rozdzielczość* obrazu (ang. *resolution*) i jego *rozmiar* (ang. *size*) w odniesieniu do rozdzielczości *główicy urządzenia drukującego* (ang. *printing head, device*), wyrażanej w punktach, a raczej *kroplach* substancji barwiącej na cal długości *dpi* (ang. *dots per inch*). Tutaj jednak zmiana samej rozdzielczości, w rozumieniu rozmiaru czy jakości w sensie popularnie zwanej „zmianą dpi”, bez metody interpolującej punkty odpowiedniej dla zastosowania nie daje dobrego wyniku, a wręcz przyczynia się do pogorszenia poprzez rozmycie (łagodne przejścia barw i odcieni w dodawanych pikselach) lub pikselizację obrazu (wyodrębnianie kwadratowych punktów o zwiększonej powierzchni posiadających tę samą barwę). Zysk z wysokiej rozdzielczości obrazu oryginalnego widać jednak w przypadku powiększania lub wycinania fragmentu obrazu. Wówczas bez zaawansowanych i czasochłonnych programowych operacji przetwarzania obrazów można oglądać szczegóły zdjęcia.

Po więcej szczegółów omawiających zagadnienia rozdzielczości obrazu zainteresowany Czytelnik może sięgnąć do artykułu [Kowal, 2014].

Podsumowując, możemy stwierdzić, że aparaty fotograficzne lub kamery CCD są często wykorzystywanym, również w przemyśle nieinwazyjnym, narzędziem wspomagającym tomografię w procesie diagnostycznym, utrwalającym zwizualizowany obraz obiektu, gdy ściany obudowy są przezroczyste (rys. 2 i 3). Ponadto przetwarzanie obrazów jest dobrze znaną dziedziną informatyki, tak więc wybranie i ewentualna modyfikacja wydajnego algorytmu nie przysparza trudności. Więcej na ten temat znajdzie Czytelnik w artykule tego samego numeru „Fides, Ratio et Patria” [Grudzień i in., 2015] oraz [Sankowski i in. 2011].

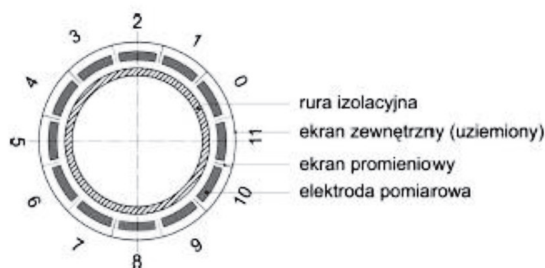
Czujniki pomiarowe

Czujniki nieinwazyjne możemy podzielić na bezdotykowe i dotykowe (kontaktowe lub stykowe). Przykładem może być pomiar temperatury termometrem w zakresie podczerwieni czy kamerą termowizyjną – w odróżnieniu od pomiaru termometrem dotykowym. W innych przypadkach użycia, np. EKG, EEG czy tomografów elektrycznych, trudno jest zastąpić metody stykowe ze względu na konieczność bezpośredniego kontaktu z badanym obiektem. Oczywiście nie zawsze możliwe jest zastąpienie jednych metod innymi, i to w obie strony. W podanych przykładach wizualizacja danych sprowadza się do prezentacji wielopunktowej w postaci wykresów w układzie kartezjańskim.

Kolejne przykłady pokazują zalety użycia metod nieinwazyjnych w porównaniu z metodami inwazyjnymi. Na przykład w medycynie bez metod rentgenowskich – począwszy od podstawowego zdjęcia Rtg, poprzez tomografię rentgenowską CT (ang. computed tomography), bez aparatów gamma i rezonansu magnetycznego MR (ang. magnetic resonance) najprostsza diagnostyka wymagałaby naruszenia ciągłości tkanki żywej, co często powodowałoby znacznie cięższe powikłania. Tak samo monitorowanie, czyli długotrwałe obserwowanie stanu pacjenta, byłoby niemożliwe. Podobnie jest w przemyśle, gdzie procesy, zwłaszcza transportowe i przepływowe, są bardzo podobne do tych, które przebiegają w organizmach żywych. I w tym przypadku diagnostyka i monitorowanie procesu wymaga, aby aparatura mogła być podłączana w różnych, często odległych miejscach w sposób prosty, szybki i bezpieczny dla personelu oraz samej aparatury. Ważne jest przy tym, aby nie naruszać obudowy obiektu, ani tym bardziej zakłócać przebiegającego procesu. Niekorzyści wynikające z uszkodzenia badanej materii są oczywiste, jednak wpływ pojedynczego zakłócenia może być trudny do prawidłowej interpretacji. Tutaj przykładem może być przepływ cieczy przez rurę; ma on charakter laminarny – warstwowy, jednak po wprowadzeniu czujnika ciecz może zacząć wirować albo być mieszana, co zmienia charakter procesu. Jeśli jednak już skutecznie zastosujemy nieinwazyjny dla procesu płaski czujnik, to nadal pozostaje kwestia naruszenia struktury rury, często wysokociśnieniowej. Stąd najbardziej poszukiwane metody pomiarowe mają charakter nieinwazyjny, a ze względu na metodę aplikacji – bezdotykowy.

Warunki te spełniają czujniki neutronowe tzw. *twardego pola* (ang. *hard field*), które nie muszą dotykać badanego przedmiotu [Grudzień i in., 2012]. Pojęcie twardego pola – w przeciwieństwie do miękkiego pola metod elektrycznych, odnosi się do linii pola, które przechodząc przez substancje o różnych właściwościach, nie załamują się, ale jedynie ulegają osłabieniu. W związku z tym analiza wyników jest dużo łatwiejsza od metod „miękkich”. Jednak ze względu na cenę, wolniejsze pozyskiwanie danych (w porównaniu z metodami elektrycznymi) i zaostrzone warunki bezpieczeństwa ich aplikacja jest ograniczona do wymagających tego zastosowań. Niestety, nawet bardzo wysoka jakość uzyskiwanych danych pomiarowych i obrazów zrekonstruowanych nie jest w stanie rozszerzyć stosowania tych metod.

Przykładem nieinwazyjnego czujnika dotykowego jest czujnik pojemnościowy przemysłowego tomografu ECT. Ze względu na omawiane cechy pola elektrycznego czujnik musi być zamontowany na zewnątrz lub wewnątrz rurociągu. W przypadku montażu czujnika na zewnątrz, tak jak na rys. 4, ścianki rury muszą mieć właściwości dielektryczne.



Rys. 4. Przekrój poprzeczny 12-elektrodowego czujnika pojemnościowego ECT (opracowanie własne)

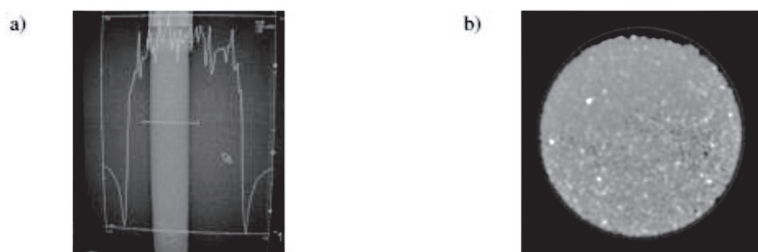
Czujniki można montować w różnych miejscach instalacji, a najczęstszym rozwiązaniem jest mocowanie czujników w parach, przy czym jeden czujnik jest nieznacznie oddalony od drugiego, tak by można było wyznaczać prędkość przepływu materiału metodami korelacyjnymi. Szczegóły procesu pomiarowego oraz cechy ECT znajdzie Czytelnik w [Chaniecki, 2006].

Wizualizacja pomiarów i wnioskowanie diagnostyczne

Wnioskowanie diagnostyczne na podstawie pomiarów jest istotnym składnikiem pracy każdego systemu przemysłowego. Metody wizualizujące dane w postaci obrazów są bardzo dobrze rozumiane przez człowieka, jednak to właśnie człowiek jest najsłabszym ogniwem każdego systemu pomiarowego. Długotrwałe oglądanie nawet najlepszej jakości obrazów męczy wzrok i powoduje pomyłki. Dlatego najlepsze są algorytmy komputerowe samodzielnie wnioskujące o stanie procesu. W tym zaś przypadku obrazy nie są najlepszym źródłem informacji. Przede wszystkim każdy algorytm tworzący obraz z danych, przetwarzający go np. ze względu na obecność szumu i wyznaczający obszar zainteresowania zawsze będzie wolniejszy od algorytmu działającego na danych pomiarowych – *raw data*, nawet jeśli konieczne będzie pewne przetwarzanie danych.

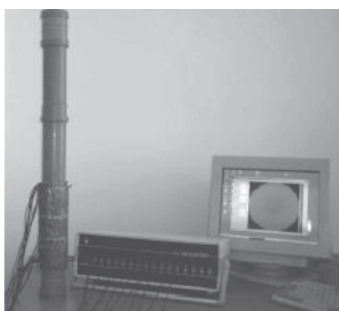
Poniżej zamieszczono kilka przypadków wizualizacji tomograficznych danych pomiarowych ze wskazaniem ich zalet i wad.

Tomografia rentgenowska promieni jest technologią drogą i wymagającą spełnienia licznych wymogów bezpieczeństwa. Daje jednak znakomitej jakości wyniki i jest niezastąpiona, zwłaszcza w przypadku wykrywania trudnych do oceny innymi metodami badań ilościowych i defektoskopii. Przykład wizualizacji materiału w zbiorniku (rys. 5) pokazuje dokładność metody; na obrazach widać pojedyncze ziarna badanego materiału i jego strukturę zagęszczenia, w tym nierównomierność w przekroju i wzdłuż wysokości silosu.



Rys. 5. Rozkład zagęszczenia materiału sypkiego (piasek średnioziarnisty) w silosie (zdjęcie z ekranu monitora tomografu) i nałożony na niego: a) topogram (przekrój wzdłużny – projekcja rentgenowska) – wykres całki współczynnika absorpcji Hounsfielda, b) tomogram (przekrój poprzeczny) – (opracowanie własne)

Na rys. 6. przedstawiono zdjęcie silosu badanego z użyciem komputerowego systemu pomiarowego elektrycznego tomografu pojemnościowego ECT.

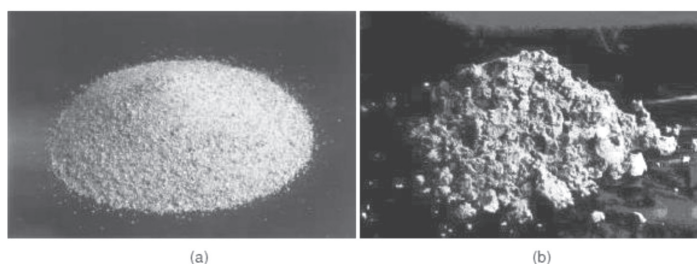


Rys. 6. Silos laboratoryjny, wyposażony w dwupłaszczyznowy (dwa przekroje oddalone od siebie o 100mm) czujnik pojemnościowy i elektryczny tomograf pojemnościowy, na stanowisku badawczym (zespół tomoKIS)

Na zdjęciu monitora widać obraz, z którego możliwe jest interpretowanie informacji o charakterze jakościowym i zgrubnie ilościowym. Jednak dla zastosowań przemysłowych metoda ta daje wyniki o wystarczającym poziomie dokładności i w dalszych rozważaniach będziemy koncentrować się właśnie na wynikach z takiego systemu.

Oprócz wspomnianego wcześniej granulatu plastikowego najczęściej składowanym w zbiornikach materiałem jest piasek. Oczywiście pod każdym względem jest najkorzystniej, gdy jest on suchy – rys. 7 (a). Jednak tak komfortowa sytuacja występuje rzadko. Najczęściej materiał jest w jakimś stopniu zawilgocony, co sprawia liczne trudności w opróżnianiu silosu, określeniu rzeczywistej wagi, rodzaju piasku itd. Aby podczas badań zapewnić własności podobne do piasku mokrego, stosuje się mieszaninę piasku z gliceryną – rys. 7 (b), dzięki czemu piasek ten tak szybko nie wysycha przy operacjach przesypywania.

Badania prowadzone są w silosach o parametrach zbliżonych do zbiorników rzeczywistych stosowanych w przemyśle. Do badań mogą być stosowane zbiorniki o przekroju okrągłym bądź prostokątnym, smukłe (wysokość jest znacznie



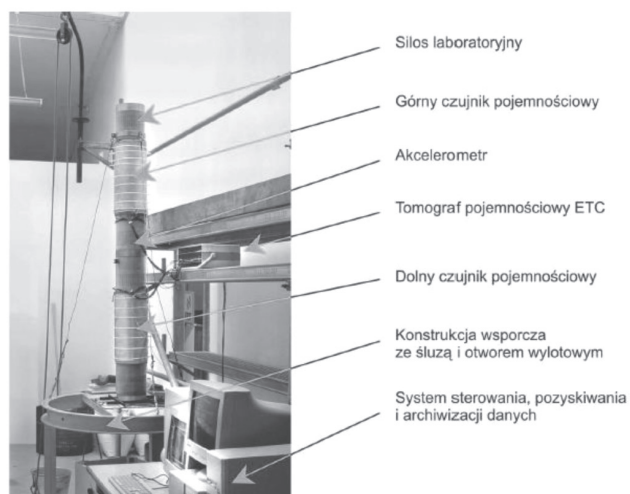
Rys. 7. Zdjęcia próbki piasku niekohezyjnego, tj. suchego (a), oraz kohezyjnej mieszaniny piasku z gliceryną (b) – (opracowanie własne)

większa od średnicy lub przekątnej) i krępe (średnica lub przekątna zbiornika jest znaczna w stosunku do wysokości). Podczas badania wysokość i średnica są stałe, zaś kąt nachylenia leja wysypowego kształtowany jest odpowiednio poprzez wybór średnicy otworu wylotowego bądź nachylenie ścian leja.

Różnice w szybkości, nasileniu efektów dynamicznych i spotykanych blokad są znaczne w zależności od rodzaju materiału, jego wilgotności, rodzaju ścian (gładkie, szorstkie), stopnia zagęszczenia wstępnego materiału.

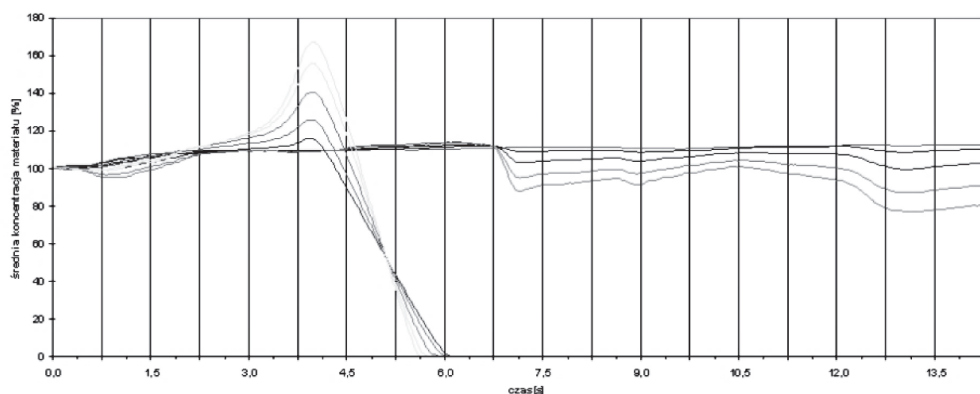
Zebrane w sposób laboratoryjny pomiary ukazują w usystematyzowany sposób trudności spotykane w praktyce i wspomagają wiedzę inżynierów podczas projektowania lub przebudowy konstrukcji silosów.

Omawiany w artykule silos (rys. 8) wyposażony jest w dwa zestawy czujników pomiarowych dla obserwacji zmian na dwóch różnych wysokościach i ewentualnie określenia prędkości opróżniania silosu metodami korelacyjnymi. Dodatkowo w połowie wysokości zbiornika umieszczono czujnik akcelerometryczny w celu wizualizacji efektów dynamicznych w trakcie opróżniania silosu.

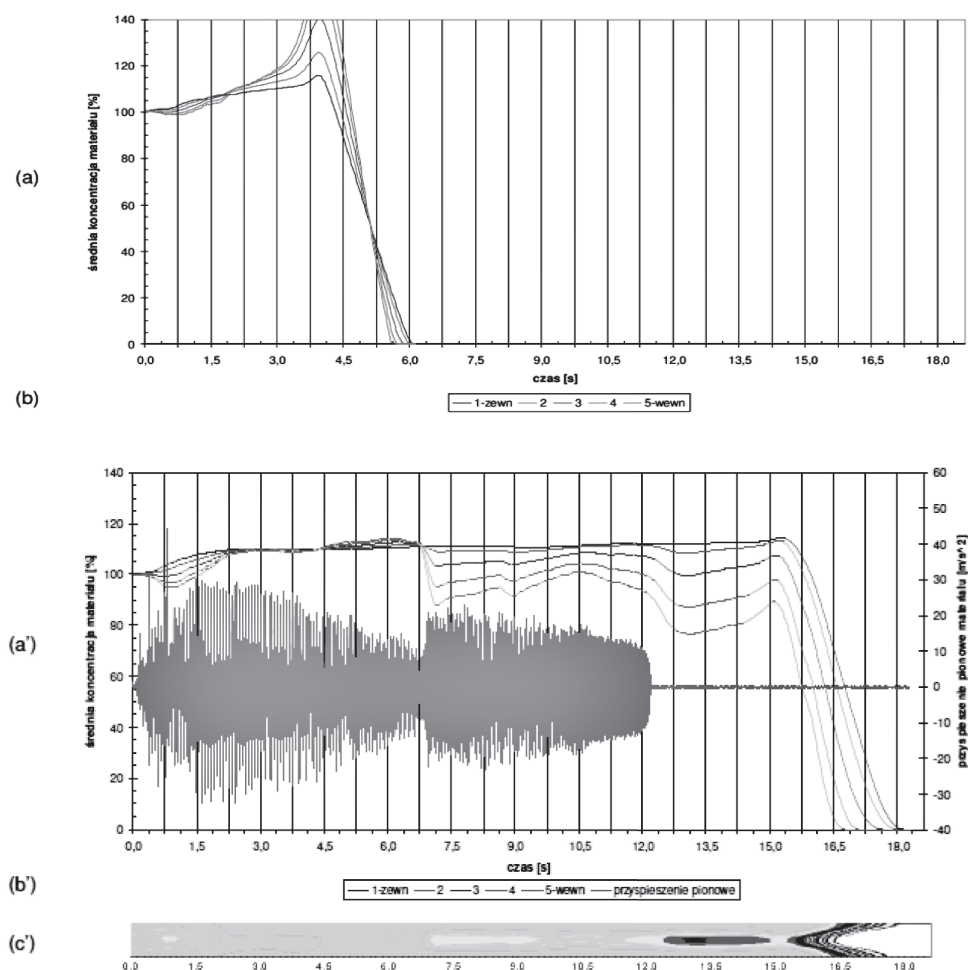


Rys. 8. Zdjęcie stanowiska do badań procesów składowania i opróżniania materiałów w silosach (opracowanie własne)

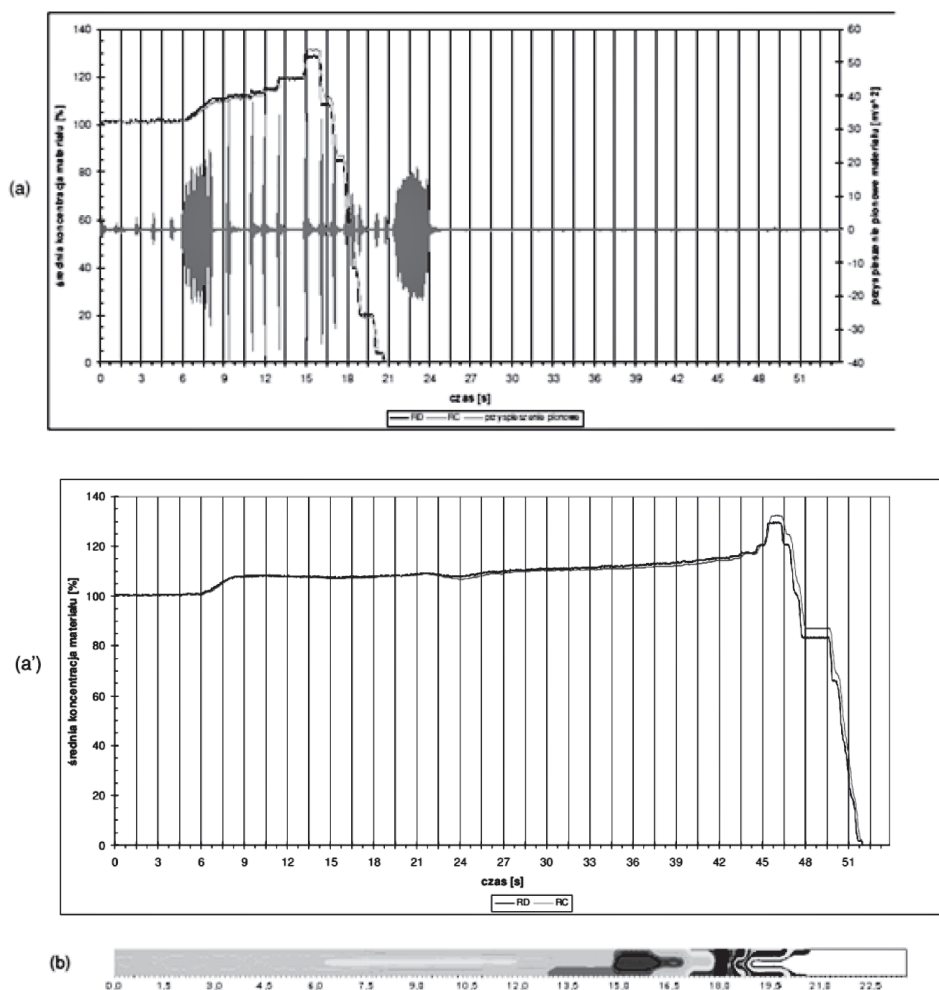
Podczas eksperymentów wyznaczone są charakterystyki rozkładu średniej koncentracji materiału w strefach ze względu na odległość od ściany silosu do środka średnicy podczas wypływu materiału z silosu; są one wykreślone na podstawie danych surowych uzyskanych z czujnika górnego i dolnego podczas eksperymentu opróżniania silosu o ścianie gładkiej z piasku niekohezyjnego usypanego w stanie luźnym. Charakterystyki te umożliwiają algorytmom samodzielne wyznaczanie parametrów przepływu chwili zatrzymania materiału oraz odległości od górnej krawędzi i ścian silosu. Topogram, będący złożeniem przekroju wzdłużnego wypływu materiału, ma formę obrazu i jego funkcjonalność może zostać wykorzystana bezpośrednio przez obsługę, jak i regulatory automatyczne. Na charakterystyki nałożono wykres przyspieszenia materiału. Warto zwrócić uwagę na intensywność i długość trwania niebezpiecznych drgań przenoszonych z materiału na konstrukcję silosu. Ważne jest również określenie różnic w kolejności ułożenia krzywych na charakterystykach i sposobu przejścia zagęszczenia w przekroju, w zależności od rodzaju materiału (rys. 9–11).



Rys. 9. Charakterystyki ciągłe średniej koncentracji materiału w obszarach przekroju poprzecznego podczas opróżniania silosu wyznaczone na podstawie pomiarów ECT wizualizowane w dwóch przekrojach (opracowanie własne)

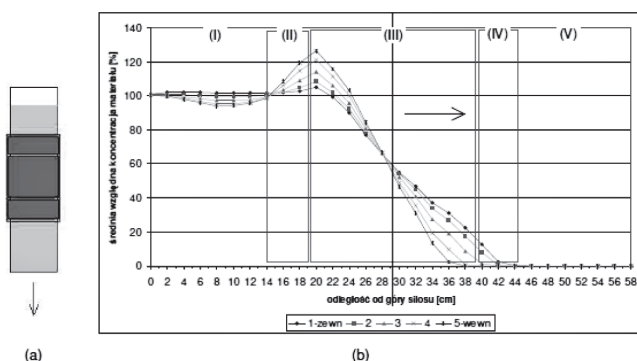


Rys. 10. Charakterystyki rozkładu średniej koncentracji materiału w strefach ze względu na odległość od ściany silosu do środka średnicy podczas wypływu materiału z silosu, wykreślone na podstawie danych surowych uzyskanych z czujnika górnego (a) i dolnego (a'), podczas eksperymentu opróżniania silosu o ścianie gładkiej z piasku niekohezyjnego usypanego w stanie luźnym; (b, b') tomogram – złożenie przekroju wzdłużnego wypływu materiału. Na charakterystykę nałożono wykres przyspieszenia materiału mierzonego w połowie wysokości silosu (opracowanie własne)



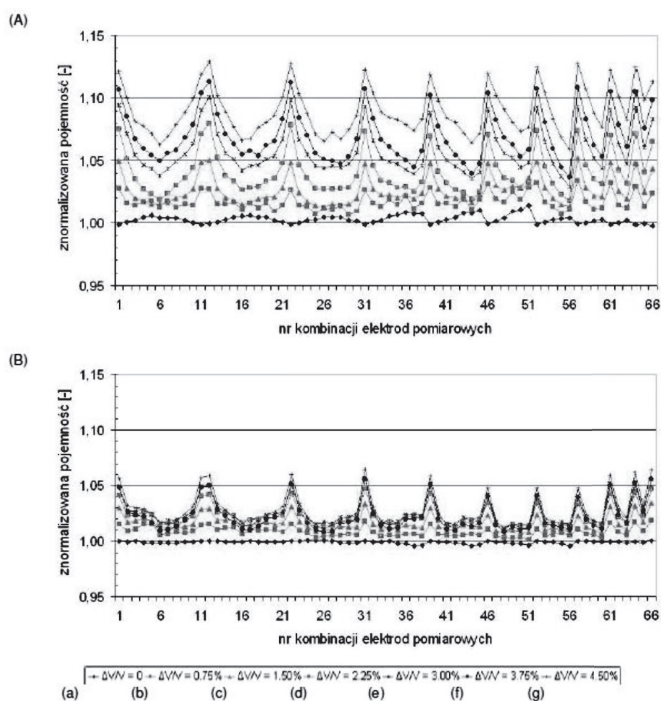
Rys. 11. Charakterystyki rozkładu średniej koncentracji materiału w strefach ze względu na odległość od ściany silosu do środka średnicy (b') podczas wypływu materiału z silosa, wykreślone na podstawie danych surowych uzyskanych z czujnika górnego (a) i dolnego (a'), podczas eksperymentu opróżniania silosu o ścianie gładkiej z piasku kohezyjnego usypanego w stanie luźnym; (b) tomogram – złożenie przekroju wzdłużnego wypływu materiału. Na charakterystykę nałożono wykres przyspieszenia materiału mierzonego w połowie wysokości silosu (opracowanie własne)

Ze względu na długość czujnika i jego konstrukcję trudność może sprawiać interpretacja uzyskiwanych wyników. Toteż dla każdego czujnika istotne jest wyznaczenie stref charakterystyk odpowiadającym elementom pomiarowym czujnika i ekranów (rys. 12).



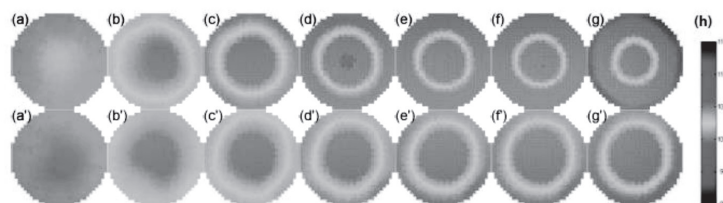
Rys. 12. Usytuowanie elektrod czujnika pomiarowego na modelu silosu (a); koncentracja materiału (b) w funkcji położenia względem elektrod pomiarowych (obszar środkowy) i ekranujących (obszary skrajne) – (opracowanie własne)

Wiedzę o zmianach pojemności elektrodowych, ważną przy analizie parametrów czujnika i właściwości materiałów, daje zwizualizowanie charakterystyk w formie wykresów zbiorczych (rys. 13). Wszelkie nierównomierności charakterystycznego układu krzywych dają się w łatwy sposób wychwycić, sygnalizując systemowi sterowania np. o uszkodzeniu elektrody czujnika.



Rys. 13. Zmiany znormalizowanych pojemności międzyelektrodowych podczas procesu zagęszczania materiału niekohezyjnego w płaszczyźnie górnej (A) i dolnej (B) – (opracowanie własne)

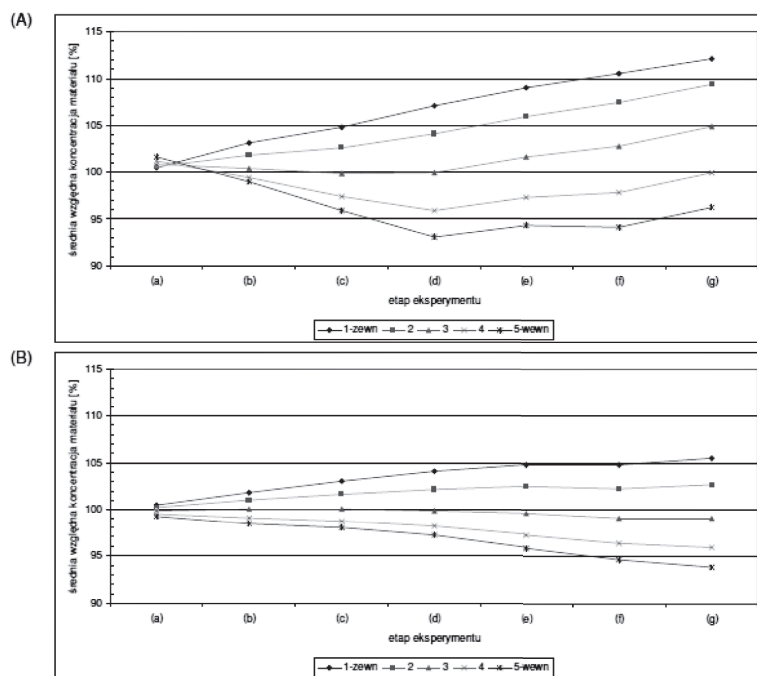
Zestawy, złożenia tomogramów (rys. 14), tzn. zrekonstruowanych obrazów [Grudzień i in., 2015], pozwalają zarówno na ocenę procesu przez obsługę, jak i na określenie np. symetrii procesu czy na ocenę jakościową procesu oraz przybliżone wnioskowanie ilościowe.



Rys. 14. Tomogramy obrazujące zmiany koncentracji niekohezyjnego materiału podczas procesu zagęszczania: (a-g) – w płaszczyźnie górnej i (a'-g') dolnej; (h) skala zmian koncentracji materiału (opracowanie własne)

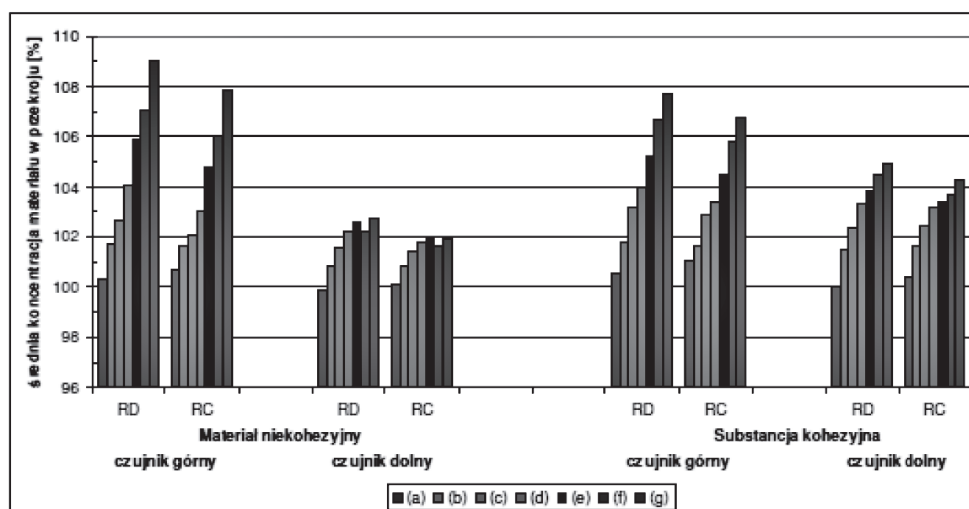
Użycie odpowiednich algorytmów przetwarzania obrazów, np. progowanie i segmentacja, umożliwia pomiar określonych cech przepływu.

Na rys. 15 widać, jak zmienia się zagęszczenie materiału, jego koncentracja w funkcji odległości od ścianek silosu.



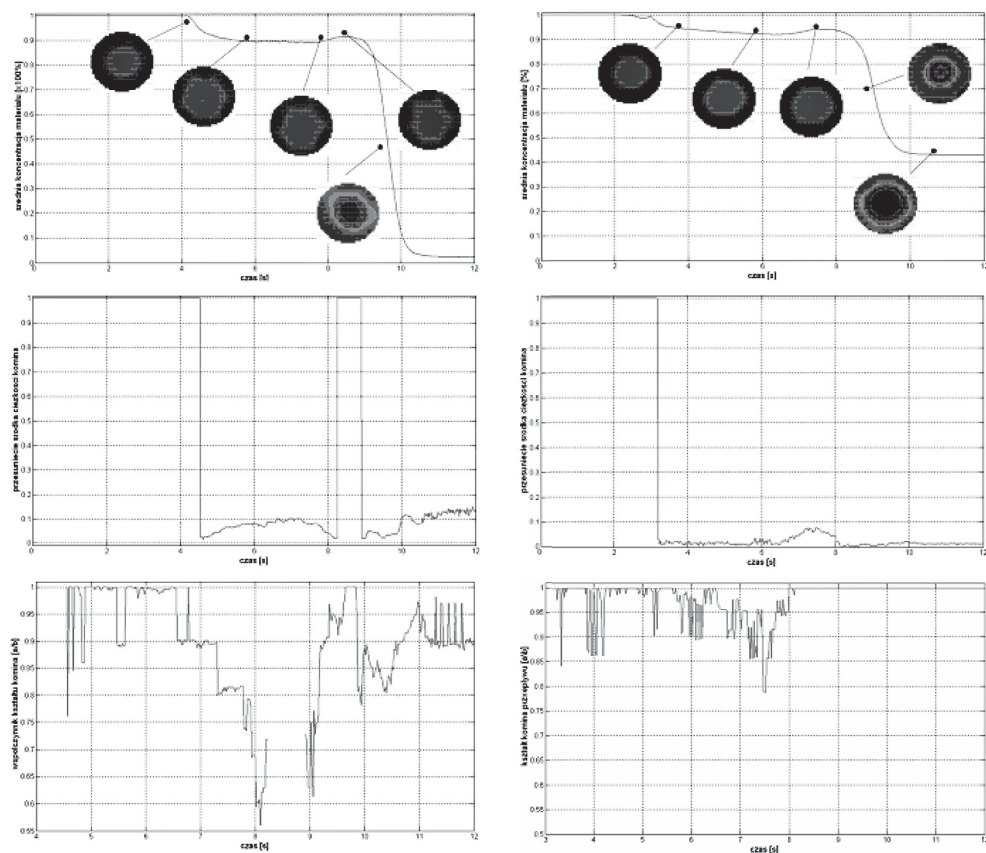
Rys. 15. Zmiany koncentracji materiału niekohezyjnego w obszarach koncentrycznych podczas procesu zagęszczania w płaszczyźnie górnej (A) i dolnej (B) – (opracowanie własne)

Wizualizacja tego samego procesu w postaci wykresów słupkowych pozwala również wyznaczać równomierność wzrostu koncentracji (rys. 16).



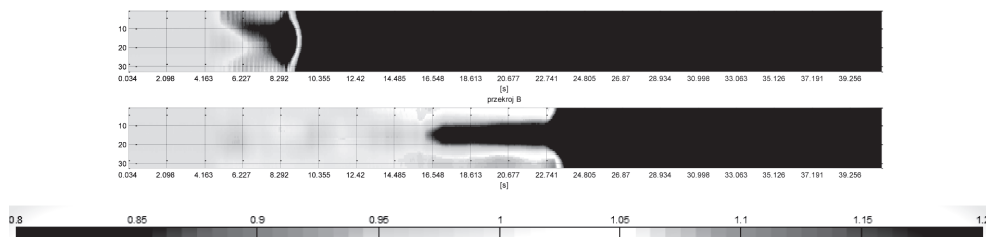
Rys. 16. Średnia koncentracja materiału w przekroju wyznaczona na podstawie danych pomiarowych (RD) i zrekonstruowanych (RC) materiału niekohezyjnego i substancji kohezyjnej podczas procesu zagęszczania (opracowanie własne)

Informacja w postaci wykresu przebiegu parametru może być wyznaczona bardzo szybko. Stąd nie ma konieczności pamięcio- i czasochłonnego procesu rekonstrukcji. Gdy system wykrywa nieprawidłowość lub stan charakterystyczny bądź nie potrafi sklasyfikować sytuacji na podstawie bazy wiedzy lub został tak ustawiony, w odpowiedniej chwili może zrekonstruować obraz i wskazać obsłudze podjęcie działań. Przykładowo na rys. 17 przedstawiono wyznaczenie parametrów komina przepływu grawitacyjnego materiału w dwóch różnych przypadkach zmiany średniej koncentracji materiału w obszarze czujnika pomiarowego, zmiany środka ciężkości komina przepływu i zmiany współczynnika kształtu komina, części centralnej, przepływu.



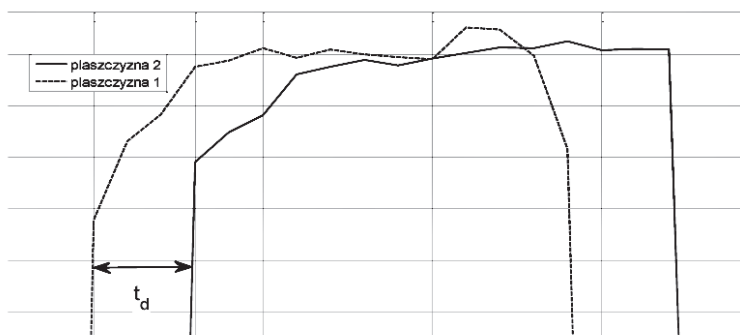
Rys. 17. Parametry komina przepływu grawitacyjnego materiału w dwóch różnych przypadkach – lewa i prawa kolumna: (pierwszy wiersz) zmiany średniej koncentracji materiału w obszarze czujnika pomiarowego; (drugi wiersz) zmiany środka ciężkości komina przepływu; (trzeci wiersz) zmiany współczynnika kształtu komina, części centralnej, przepływu (opracowanie własne)

Innym sposobem wizualizacji przebiegu zmian parametrów procesu są topogramy (rys. 18). Jest to wizualizacja w postaci złożenia przekrojów poprzecznych z przekrojów podłużnych przepływu materiału w formie obrazu dwuwymiarowego. Gdyby pozostawić takie złożenie bez przecięcia w kierunku podłużnym, uzyskaloby się obraz 3D, trudny w interpretacji, zwłaszcza automatycznej.



Rys. 18. Topogramy – wizualizacja w postaci złożenia przekrojów poprzecznych w postaci przekrojów podłużnych przepływu materiału, na różnych wysokościach zbiornika z materiałem sypkim, podczas wypływu grawitacyjnego materiału; dolny rysunek skala odcieni szarości reprezentująca zagęszczenie materiału – topogramy należy oglądać w pionie (opracowanie własne)

Powszechną trudność sprawia wizualizacja niewielkich zmian na wykresie w wysokiej skali. Wówczas najlepszym rozwiązaniem jest powiększenie danego wycinka i umieszczenie go w oknie wykresu w obszarze widocznym dla obsługi (rys. 19).



Rys. 19. Charakterystyka średniej koncentracji materiału w dwóch płaszczyznach przekroju. Na powiększeniu zaznaczono przesunięcie t_d wykresów, wynikające z odległości między płaszczyznami pomiarowymi (opracowanie własne)

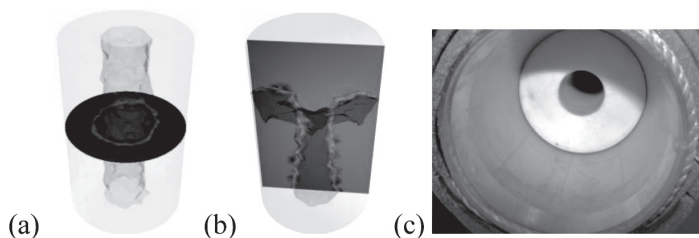
Zestawienie wektora przekroju obrazu (rys. 18) może posłużyć do wyznaczania różnego rodzaju parametrów. Przykładowo w pierwszej kolumnie rys. 20 przedstawiono zestawienie, które służy do wyznaczania ilości materiału w złożu stacjonarnym zalegającym na dnie rury. Parametr ten jest istotny w określeniu rzeczywistej ilości transportowanego materiału oraz w zapobieganiu zablokowaniu rurociągu. W drugiej kolumnie rys. 20 zamieszczono wizualizację korków w odcinku poziomym (ang. *slug*) w celu wyznaczenia parametrów ilości transportowanego materiału w odcinku poziomym, co jest pomocne w nastawieniu

nastaw dmuchawy gazu transportującego materiał. Zbyt mała ilość materiału w danej serii może doprowadzić do transportu materiału w fazie lotnej, co jest nieekonomiczne, zaś za długie korki mogą zablokować przepływ. W drugim wierszu zestawiono różne metody filtrowania danych, składane w celu wyboru najdokładniejszych zestawów danych diagnostycznych. Więcej na ten temat Czytelnik znajdzie w [Chaniecki, 2006].



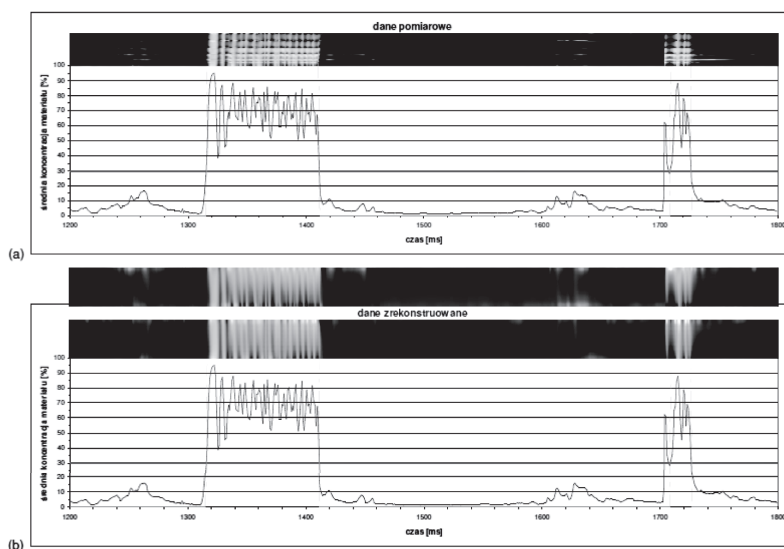
Rys. 20. Zestawienie: (pierwszy wiersz) wektora przekroju obrazu dla dwóch różnych przypadków pomiarów danych tomograficznych w odcinku poziomym transportu pneumatycznego granulatu plastikowego; (drugi wiersz) wyników różnych sposobów filtrowania danych w celu wyznaczenia najdokładniejszych zestawów danych diagnostycznych (opracowanie własne)

Innym sposobem wizualizacji danych, szczególnie atrakcyjnym wzrokowo, jest wizualizacja 3D. Przykładowo prezentowany na rys. 21 model przepływu pierścieniowego pozwala na wyznaczenie jego parametrów.



Rys. 21. Wizualizacja trójwymiarowa modelu przepływu pierścieniowego: (a) wizualizacja pustej przestrzeni w odniesieniu do pojedynczego przekroju poprzecznego; (b) wizualizacja w postaci przekroju wzdłużnego; (c) model obiektu [Zespół tomoKIS, 2012]

Na rys. 22 przedstawiono porównanie dokładności wyznaczania parametrów korków w odcinku pionowym rurociągu transportującego materiał sypki z użyciem surowych danych pomiarowych *raw data* i danych zrekonstruowanych. Niewielkie, nieznaczące w procesie diagnostyki przemysłowych różnice wyników wskazują, że dla uzyskania istotnej informacji nie jest konieczne stosowanie w takim przypadku wymagającej znacznej mocy obliczeniowej metody rekonstrukcji obrazów, ale wystarczy wizualizacja i przetwarzanie bezpośrednich surowych danych *raw data* [Chaniecki, 2006].



Rys. 22. Wyznaczone parametry sekwencji korków (początki i końce – pionowe przerywane linie) dla danych pomiarowych i zrekonstruowanych w odcinku pionowym transportu pneumatycznego materiału sypanego; na poziomie 30 procent oznaczono wartość progu klasyfikacji (opracowanie własne)

Zestawienie metod zaprezentowane w tym rozdziale pozwala Czytelnikowi zapoznać się z szerokim zestawem metod wizualizacji danych tomograficznych stosowanych w diagnostyce procesów przemysłowych. Wskazuje to, że nie wystarczy stosowanie jednej, uniwersalnej metody wizualizacji, a od trafnego wyboru metody zależy jakość i trafność wnioskowanych informacji.

Podsumowanie

Jak zauważono w artykule, słowo „dane” pochodzi z łac. *notitia*, jednak najważniejsze spostrzeżenie dotyczy tego, że łacińskie *notitia* oznacza również wiedzę (!). Informacja wizualna jest dla człowieka bardzo ważna, jednak również osoba niewidoma może uzyskać niemal te same informacje, jeśli jej mózg w odpowiedni sposób będzie interpretować dane.

Właśnie dlatego umiejętność wizualizacji danych, w tym danych tomograficznych w procesach przemysłowych, bez względu na to, jak zostanie wykonana, ale dająca możliwość wyciągania odpowiednich wniosków, jest celem działania informatyków podejmujących wyzwanie pozyskiwania wiedzy z danych dla systemu sterującego, tak jak to robi mózg człowieka zarówno widzącego, jak i niewidzącego.

Porównanie różnych metod wizualizacji tego samego przypadku pozwala ukazać różnorodność informacji uzyskiwanych z danych pomiarów w zależności od sposobu wizualizacji. Wybór odpowiedniej metody wizualizacji nie jest łatwy; musi zostać dokonany ręcznie na podstawie doświadczenia obsługi inżynierskiej, często metodą prób i błędów. Od tego wyboru może zależeć prawidłowa diagnostyka procesu przemysłowego.

Należy również zauważyć, że dane tomograficzne są to ogromne i niemalże niepoliczalne zbiory danych. Klasyfikuje je to do obecnie bardzo szeroko dyskutowanego problemu współczesnego świata, zwanego *big data*. Zauważa się, że w tym przypadku największym wyzwaniem jest bezpieczne gromadzenie takich zbiorów na drogich nośnikach z dostępem bezpośrednim, a więc najlepiej na dyskach sieciowych; zapewnienie bezpieczeństwa tych danych, zwłaszcza gdy są to tak zwane dane wrażliwe, a więc dane osobowe, ale także przemysłowe. Jednak największym problemem jest pozyskanie z tych zbiorów bardzo wąskich porcji istotnych dla poszukującego człowieka lub systemu informacji w czasie tak krótkim, jak jest to tylko konieczne do prawidłowego funkcjonowania systemu.

Słowa kluczowe: *wizualizacja, obrazowanie tomograficzne, procesy przemysłowe.*

Summary

Visualization of tomography data in the diagnosis of industrial processes

The paper presents a summary comparing the wide range of ways to visualize tomographic measurement data used for diagnostics of industrial processes. It was pointed out that visualization is not just an aspiration to obtain images understood by human eyes, but that any representation of data that allow to deduce on the topic. Hence the skilful visualization of information in diagnostics of industrial processes, no matter how it will be done, makes it possible to draw the appropriate conclusions. Also was noted that the measurement and subsequent the visualization of generated big data is problematic, not only in the process of storage, but particularly in finding relevant information about process.

The introduction of meanings in Latin stresses interest since ancient times; words, which are marked in italic are crucial in the article.

Keywords: *Visualization, tomography imaging, industrial processes.*

Bibliografia

Opracowania

- Chaniecki Zbigniew, *Algorytmy przetwarzania i analizy danych pomiarowych elektrycznej tomografii pojemnościowej w diagnostyce wybranych procesów przemysłowych*, Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka 2006.
- Chaniecki Zbigniew, Dominik Sankowski, *Monitorowanie i diagnozowanie stanów dynamicznych z użyciem tomografii procesowej*, Diagnostyka Procesów i Systemów – DPS 2007, materiały konferencyjne Słubice, 10-12 września 2007.
- Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania*, pod red. Józefa Korbicza i in. Warszawa 2004.
- Grudzień Krzysztof i in., *Analysis of the bulk solid flow during gravitational silo emptying using X-ray and ECT tomography*, Powder Technology 2012.
- Niedostatkiewicz Maciej, *Efekty dynamiczne w silosach*, praca doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2003.
- Płaskowski Andrzej i in., *Imaging Industrial flows, applications of electrical process tomography*, Institute of Physics Publishing, Bristol 1995.
- Process Tomography: Principles, Techniques and Applications*, eds. Williams Richard A., Beck Maurice S., Butterworth-Heinemann, Oxford 1995.
- Sankowski Dominik, Mosorow Volodymyr, Strzecha Krzysztof, *Przetwarzanie i analiza obrazów w systemach przemysłowych*, Warszawa 2011.
- Scott David M., McCann Hugh, *Process Tomography*, ed. by Scott & McCann, Process Imaging for automatic control, Taylor and Francis Group 2005.

Internet

- Kowal Tomasz, *Ach te piksele! Teoria obrazu*, marzec 2014, http://www.tomaszkowal.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=204:ach-te-piksele-czyli-o-rozdzielczosciach-ekranach-i-cyfrowych-obrazach&catid=11:szczypta-wiedzy&Itemid=57.
- Zespół tomoKIS, *Sprawozdanie z projektu DENIDIA*, <http://www.kis.p.lodz.pl/reports.html?lang=en>.