

AUTOREFERAT

**przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych,
w szczególności określonych w art. 16 ust. 2 ustawy
o stopniach naukowych i tytule naukowym**

dr inż. Krzysztof Grudzień
Instytut Informatyki Stosowanej
Wydział Elektroniki, Elektrotechniki, Informatyki i Automatyki
Politechnika Łódzka

Łódź, 07.11.2018



SPIS TREŚCI

Spis treści

1. Dane osobowe.....	3
2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe.....	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	3
4. Wskazanie osiągnięcia naukowego	4
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego	4
4.2. Cykl dwudziestu prac naukowych, powiązanych tematycznie	4
5. Prace naukowe w okresie doktoratu – wstęp do badań	7
6. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników	10
Słowo wstępu - motywacja.....	10
6.1. Proces przepływu materiałów sypkich.....	12
6.2. Metody obrazowania przepływów materiałów sypkich – stan wiedzy	14
6.3. Algorytmy akwizycji danych i konstrukcji obrazów ECT dedykowanych przepływowi materiałów sypkich.....	17
6.4. Przetwarzanie i analiza danych obrazowych ECT	20
6.5. Przetwarzanie i analiza obrazów promieniowania rentgenowskiego procesów przemysłowych.....	23
Podsumowanie	26
Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze	28
Literatura.....	28

1. Dane osobowe

Imię i nazwisko Krzysztof Grudzień

Adres służbowy: Instytut Informatyki Stosowanej
Politechniki Łódzkiej
ul. Stefanowskiego 18/22
90-924 Łódź

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

- 2007 Nadanie stopnia doktora nauk technicznych w zakresie Informatyki przez Radę Wydziału Elektroniki, Elektrotechniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej. Rozprawa pod tytułem „*Algorytmy segmentacji dla potrzeb wizualizacji parametrów diagnostycznych przepływów wielofazowych w wybranych systemach przemysłowych*” promotor: prof. dr hab. inż. Dominik Sankowski, obroniona **z wyróżnieniem** na Wydziale Elektroniki, Elektrotechniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej w dniu 26.06.2007r.
- 2001 Dyplom magistra inżyniera w dyscyplinie Elektronika. Ukończenie studiów wyższych na Politechnice Łódzkiej na wydziale Elektrotechniki i Elektroniki, kierunku Elektronika i Telekomunikacja uzyskałem dyplom magistra inżyniera o specjalności Aparatura Elektroniczna. Praca magisterska: „*Przetwarzanie obrazów w czasie rzeczywistym w układach FPGA*” obroniona z oceną bardzo dobrą.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- 09.2007 - obecnie Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej, stanowisko: adiunkt, w wymiarze pełnego etatu.
- 12.2001-08.2007 Politechnika Łódzka, Katedra Informatyki Stosowanej, stanowisko: asystent w wymiarze $\frac{3}{4}$ etatu.

4. Wskazanie osiągnięcia naukowego

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Algorytmy akwizycji, przetwarzania i analizy informacji wizyjnej w systemach tomografii procesowej

4.2. Cykl dwudziestu prac naukowych, powiązanych tematycznie

Podjęty przeze mnie temat badań, w latach 2008-2017, dotyczył zagadnień związanych z systemami sprzętowo-programistycznymi dedykowanymi konstrukcji, przetwarzaniu oraz analizie obrazu procesu przemysłowego. Publikacje naukowe mojego autorstwa i współautorstwa pokazują szeroką interdyscyplinarność zagadnienia związanego z rozwojem systemów obrazowania procesu przemysłowego. Opracowanie nowych rozwiązań informatycznych w zastosowaniu do obrazowania i pomiaru procesów przemysłowych, wymagał ścisłej współpracy z naukowcami zajmującymi się badaniem procesów, jak również wykazujących się znaczącym doświadczeniem przy stosowaniu systemów tomograficznych w zakresie inżynierii materiałowej.

Zebrany cykl publikacji, powiązany tematycznie, przedstawiam jako osiągnięcie naukowe (wynikające z art. 16 ust. 2 Ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki). W skład cyklu publikacji wchodzi artykuły z czasopism indeksowanych w bazie JCR i na liście MNiSW część A oraz publikacje z czasopism z części B listy MNiSW. Uwzględniono również znaczące rozdziały w monografiach naukowych. Pozycje z cyklu zostały wymienione w kolejności chronologicznej, w dwóch grupach: publikacji z listy filadelfijskiej oraz publikacji w czasopismach z części B listy MNiSW. Sumaryczna wartość parametru „*impact factor*” IF dla 13-stu publikacji przedstawionych w ramach cyklu wynosi 22.395¹. **Sumaryczna liczba punktów według MNiSW**, zgodnie z obowiązującym w roku 2017 wykazem czasopism naukowych, jest **równa 410** (lista A) oraz **51** (lista B). **Mój indeks Hirscha wg bazy Web of Science wynosi 7**. Szczegóły dorobku parametrycznego zostały zebrane w załączniku 4. Wkład mojej pracy w poszczególne artykuły został wyszczególniony w załączniku 3.

Część A listy MNiSW (JCR):

- [1] Rybak G., Chaniecki Z., **Grudzień K.**, Sankowski D., (2018), *Analysis of silo flow dynamic effects using ECT and Short Time Fourier Transform*, Flow Measurement and Instrumentation, (<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.02.003>), udział własny: 20%
- [2] **Grudzień K.**, Babout L., Chaniecki Z., (2017), *Study of granular flow in silo based on electrical capacitance tomography and optical imaging*, Flow Measurement and Instrumentation, (<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.11.001>), Udział własny: 60%
- [3] **Grudzień K.**, (2017), *Visualization system for large scale silo flow monitoring based on ECT technique*, IEEE Sensors Journal, vol. 17, no. 24, pp. 8242-8250, udział własny: 100%

¹ Współczynniki IF zostały podane według bazy JCR zgodnie z rokiem publikacji. Liczbę punktów MNiSW, przyznawaną za publikację, wyszczególniono zgodnie z obowiązującym wykazem czasopism naukowych ogłoszonym przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z 20 grudnia 2017.

Grudzień K.

- [4] Saoud A., Mosorow W., **Grudzień K.**, (2016), *Measurement of velocity of gas/solid swirl flow using Electrical Capacitance Tomography and cross correlation technique*, Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 53, pp. 173-140, udział własny: 35%
- [5] Chen Ch., Woźniak P., Romanowski A., Obaid M., Jaworski T., Kucharski J., **Grudzień K.**, Zhao S., Fjeld M., (2016), *Using Crowdsourcing for Scientific Analysis of Industrial Tomographic Images*, ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, Vol. 7, 4, pp. 52:1--52:25, udział własny: 15%
- [6] Babout L., **Grudzień K.**, Maire E., Withers P.J., (2013), *Influence of wall roughness and packing density on stagnant zone formation during funnel flow discharge from a silo: An X-ray imaging study*, Chemical Engineering Science, vol. 97, pp. 210–224, udział własny: 45%
- [7] **Grudzień K.**, Niedostatkiwicz M., Adrien J., Maire E., Babout L., (2012), *Analysis of the bulk solid flow during gravitational silo emptying using X-ray and ECT tomography*, Powder Technology, vol. 224, pp. 196–208, udział własny: 20%
- [8] **Grudzień K.**, Chaniecki Z., Romanowski A., Niedostatkiwicz M., Sankowski D., (2012), *ECT Image Analysis Methods for Shear Zone Measurements during Silo Discharging Process*, Chinese Journal of Chemical Engineering, vol. 20, no. 2, pp. 205-410, udział własny: 20%
- [9] **Grudzień K.**, Niedostatkiwicz M., Adrien J., Tejchman J., Maire E., (2011), *Quantitative estimation of volume changes of granular materials during silo flow using X-ray tomography*, Chemical Engineering and Processing, 2010, vol. 50, no. 1, pp. 59-67, udział własny: 20%
- [10] **Grudzień K.**, Chaniecki Z., Romanowski A., Niedostatkiwicz M., Sankowski D., (2010), *Description of the silo flow and bulk solid pulsation detection using ECT*, Flow Measurement and Instrumentation, vol. 21, no. 3, p. 198-206, udział własny: 20%
- [11] Niedostatkiwicz M., Tejchman J., **Grudzień K.**, Chaniecki Z., (2010), *Application of ECT to solid concentration measurements during granular flow in a rectangular model silo*, Chemical Engineering Research and Design, vol. 88, no. 8, pp. 1037-1048, udział własny: 25%
- [12] Niedostatkiwicz M., Tejchman J., Chaniecki Z., **Grudzień K.**, (2009), *Determination of bulk solid concentration changes during granular flow in a model silo with ECT sensors*, Chemical Engineering Science, vol. 64, no. 1, p. 20-30, udział własny: 25%
- [13] **Grudzień K.**, Romanowski A., Williams R.A., Sankowski D., (2008), *Gravitational Granular Flow Dynamics Study Based on Tomographic Data Processing*, Particulate Science and Technology, vol 26, no. 1, pp. 67 – 82, udział własny: 45%

Część B listy MNiSW:

- [14] Waktola S., **Grudzień K.**, Babout L., (2015), *3D Reconstruction of Funnel Flow Boundary Using Automatic Point Set Extraction*, Image Processing & Communications, vol. 20, no. 3, pp. 35–43, udział własny: 40%
- [15] **Grudzień K.**, (2015), *Analysis of the Granular Material Concentration Changes During Silo Discharging Process Based on X-Ray Image Analysis*, Image Processing & Communication, vol. 19, no. 2-3, pp. 107–117, udział własny: 100%

- [16] **Grudzień, K.** Chaniecki, Z. Matusiak, B. Romanowski, A. Rybak, G. Sankowski, D., (2013), *Visualisation of Granular Material Concentration Changes, During Silo Discharging Process, Using ECT Large Scale Sensor*, Image Processing & Communications, 2012, Vol.17, no.4, pp. 327-338, udział własny: 40%
- [17] **Grudzień K.**, Gonzalez M., (2013), *Detection of tracer particles in tomography images for analysis of gravitational flow in silo*, Image Processing & Communications, vol. 18, no. 2-3, pp. 11-22, udział własny: 80%
- [18] **Grudzień K.**, (2012), *Radiography image processing for analysis of gravitational funnel flow in silo*, Computer Science in Novel Applications, Lodz, ISBN 978-83-7283-376-1, udział własny: 100%
- [19] **Grudzień K.**, Chaniecki Z., Romanowski A., Betiuk J., Matusiak B., Sankowski D., (2011), *Monitorowanie przemysłowych systemów przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich w silosach o dużych gabarytach z użyciem tomografii ECT - badania wstępne*, AUTOMATYKA, 2011, t. 15, Zeszyt 3, s. 561-570, udział własny: 45%
- [20] **Grudzień K.**, Maire E., Adrien J., Sankowski D., (2010), *Analysis of Funnel Flow in Rectangular Silo Based on ECT Data*, AUTOMATYKA, t. 14, zeszyt 3/2, pp .681-694, udział własny: 70%

Moje osiągnięcia badawcze są wynikiem przede wszystkim udziałów w projektach badawczych, finansowanych zarówno ze źródeł międzynarodowych jak i krajowych. **Uczestniczyłem w 10 projektach (zał. 3.II.J), w których dwukrotnie pełniłem rolę kierownika.** Najistotniejszych z nich to projekt pt. „*Development of Excellence in Non-Invasive Diagnostic System for Industrials and Scientific Applications*” o akronimie: DENIDIA (2006-2010), w którym byłem głównym wykonawcą, realizowany w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. Finansowany był bezpośrednio ze środków unijnych, w ramach 6. Programu Ramowego - *Mobility - Marie Curie Host Fellowships for the Transfer of Knowledge* (budżet 950 tys. euro). **Moje prace skupiły się na opracowaniu nowych algorytmów akwizycji, przetwarzania i analizy danych tomograficznych, pochodzących z systemów elektrycznej tomografii pojemnościowej (ECT tomography) oraz rentgenowskiej tomografii procesowej (X-ray tomography).** Udział w międzynarodowych projektach umożliwił mi również odbycie wielomiesięcznych staży naukowych w renomowanych europejskich ośrodkach badawczych m.in. w Anglii, Francji, Niemczech (zał. 3. III. L). Prace naukowe prowadzone były w interdyscyplinarnych zespołach naukowych, w których znajdowali się eksperci z dziedzin inżynierii procesowej, metrologii (HZDR Dresden), materiałoznawstwa (INSA Lyon, University of Manchester) oraz budownictwa (Politechnika Gdańska). **W zespołach tych moje zadania dotyczyły zagadnień informatycznych, związanych z dostarczaniem informacji wizyjnej o procesie, z uwzględnieniem algorytmów akwizycji danych (jako pierwszego etapu przetwarzania danych) oraz przetwarzania i analizy obrazów.**

Oświadczenia o indywidualnym wkładzie, moim i współautorów wymienionych publikacji stanowiących ich monotematyczny cykl, (w poszczególnych etapach ich przygotowywania) zostały dołączone do niniejszego wniosku w postaci załącznika 5.

Grudzień K.

5. Prace naukowe w okresie doktoratu – wstęp do badań

W latach 2001-2006, w okresie studiów doktoranckich, pracowałem nad rozwojem i zastosowaniem elektrycznej tomografii pojemnościowej (ang. *electrical capacitance tomography*, ECT) do analizy transportu materiału sypkiego w instalacjach przepływu pneumatycznego oraz możliwością wizualizacji zmian koncentracji struktur materiału w trakcie składowania i rozładowywania zbiorników. Dla obu typów przepływu udowodniono możliwość ich wizualizacji oraz skuteczność działania metod przetwarzania i analizy obrazów tomograficznych. **Główne wyniki prac naukowych, wykonanych w ramach doktoratu, zostały przedstawione w trzech artykułach z listy JCR.** Należą do nich publikacje w *Particle & Particle Systems Characterization*, (5-year impact factor 2.51, 2006 Impact Factor 0.639, 2014 / 2015 Impact Factor 3.081):

- a) **Grudzień** K., Romanowski A., Williams RA., 2005, *Application of a Bayesian Approach to the Tomographic Analysis of Hopper Flow*, PPSCh, DOI: 10.1002/ppsc.200500951, (MNiSW 30).
- b) Romanowski A., **Grudzień** K., Williams RA., 2006, *Analysis and Interpretation of Hopper Flow Behaviour Using Electrical Capacitance Tomography*, PPSCh, 10.1002/ppsc.200601060, (MNiSW 30).
- c) Romanowski A., **Grudzień** K., Robert G. Aykroyd, Richard A. Williams, 2006, *Advanced Statistical Analysis as a Novel Tool to Pneumatic Conveying Monitoring and Control Strategy Development*, PPSCh, DOI: 10.1002/ppsc.200601059, (MNiSW 30).

Przeprowadzone badania, **podsumowane rozprawą doktorską, obronioną z wyróżnieniem w 2007 roku**, wykazały potrzebę rozwiązania szeregu pojawiających się zagadnień, dotyczących:

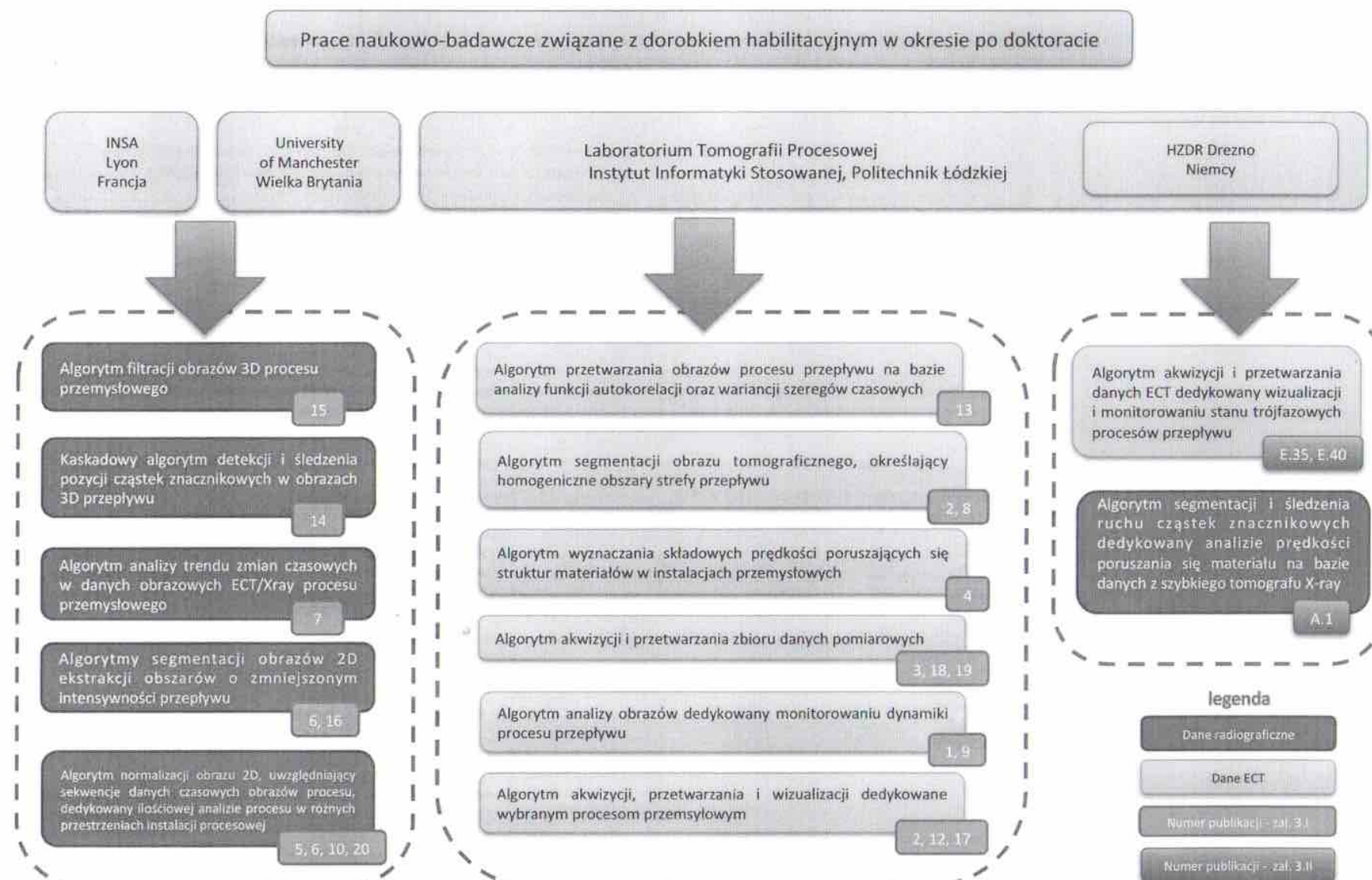
- projektowania i budowy tomograficznych systemów wizyjnych dla potrzeb wizualizacji procesu w warunkach przemysłowych;
- opracowania algorytmów przetwarzania obrazów tomograficznych dedykowanych monitorowaniu procesów przepływu;
- opracowania metody umożliwiającej analizę efektów dynamicznych występujących podczas opróżniania silosów;
- opracowania metody wyznaczającej parametry przepływu kominowego oraz masowego;
- opracowania algorytmów analizy obrazów do pomiaru prędkości przepływu wirowego;
- określenie dokładności obrazowania zmian koncentracji materiałów sypkich w systemach tomograficznych.

Elementy te wyznaczyły drogę do dalszych prac dotyczących **opracowania algorytmów akwizycji danych przy obrazowaniu procesów przemysłowych oraz przetwarzania i analizy informacji wizyjnej w celu monitorowania stanu procesu**. Główne prace w tym zakresie, w latach 2007-2017, prowadziłem zarówno samodzielnie, jak również wraz z zespołem naukowców z *Instytutu Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej*. Celem opracowywanych metod było dostarczenie nowatorskich rozwiązań służących możliwości uzyskania zarówno parametrycznego opisu procesów

przemysłowych jak również informacji o procesie przedstawionej w formie obrazu. Część badań zostało także przeprowadzonych z naukowcami zajmującymi się badaniami procesów składowania i transportu materiałów sypkich (*Politechnika Gdańska, Katedra Budownictwa i Inżynierii Materiałowej*). Ta współpraca była istotna przy weryfikacji metod i interpretacji otrzymanych wyników. Oprócz systemów ECT moje badania związane były również z zastosowaniem metod opartych na wykorzystaniu promieni X (X-ray tomography). Uczestniczyłem w interdyscyplinarnych badaniach, w których brali udział również naukowcy pracujący w laboratoriach wyposażonych w przemysłowe systemy tomografii rentgenowskiej (*University of Manchester, School of Materials; INSA Lyon*). Należy nadmienić, że dzięki tej interdyscyplinarnej, międzynarodowej współpracy możliwe było dogłębne poznanie problematyki procesów przemysłowych oraz technik obrazowania. Pozwoliło mi to na opracowanie komputerowych systemów, stanowiących odpowiedź na pytania związane z problemami obrazowania i monitorowania procesów przemysłowych. Wymiernym efektem tych prac, oprócz cyklu publikacji naukowych, jest również patent europejski, którego jest współautorem. Patent opisuje metodę wizualizacji przepływu wielofazowego z zastosowaniem wielomodalnego systemu pomiarowego (zał. 3.II.C).

Na rysunku 1 został przedstawiony zbiór wyników mojej działalności naukowo-badawczej po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych z uwzględnieniem staży naukowych oraz listą opracowanych algorytmów. Działalność ta obejmowała:

- przetwarzanie i analizę obrazów radiograficznych;
- przetwarzanie i analizę obrazów ECT;
- akwizycję danych oraz wizualizację procesów przemysłowych na bazie danych ECT;
- konstrukcję stanowisk eksperymentalnych.



Rysunek 1. Zestawienie algorytmów akwizycji, przetwarzania oraz analizy danych tomograficznych opracowane po okresie doktoratu

*Problemy
Krytyka*

6. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników

Słowo wstępu - motywacja

Oceniając stan otaczającego nas świata najwięcej znaczącej informacji dostarcza nam zmysł wzroku. Zbudowany, przez odpowiednią reakcję receptorów nerwowych, obraz promieniowania elektromagnetycznego oraz umiejętność jego analizy pozwala na podejmowanie decyzji w naszym życiu. Zalety tego sposobu postrzegania otoczenia zostały dostrzeżone przez wielu uczonych zajmujących się m.in. badaniem procesów przemysłowych (Scott i McCann, 2005)(Sankowski i Sikora, 2012)(Williams i Beck, 1995)(Sideman i Hijikata, 1993)(Crowe, 2005)(Plaskowski et al., 1995). W związku z koniecznością pozyskiwania coraz to głębszej wiedzy na temat przestrzenno – czasowych zmian stanu badanego procesu, wymagania stawiane systemom pomiarowo-kontrolnym w ostatnich latach znacząco wzrastają. Systemy wizyjne stosowane zarówno podczas prac badawczo-pomiarowych, jak i w modułach monitorowania oraz kontroli procesów przemysłowych stanowią nieodzowny element pozyskiwania informacji, bez którego niejednokrotnie analiza procesu zostaje pozbawiona wielu istotnych elementów. Powstający obraz procesu dostarcza bogatej informacji o stanie analizowanych zjawisk. Zdobyta w ten sposób wiedza jest kluczowym źródłem wiadomości o mechanizmach zachodzących w trakcie procesów.

Środowisko przemysłowe jest jednak niesprzyjające klasycznym technikom obrazowania, opartym o detektory światła widzialnego. Ze względu na charakter instalacji, powodującej brak dostępu do samego procesu, czy zbyt niską skuteczność działania metod obrazowania, wizualizacja w warunkach przemysłowych staje się niejednokrotnie ograniczona bądź wręcz niemożliwa. Analogiczna sytuacja pojawia się w przypadku problemów widzenia u człowieka, bądź nawet jego braku. W takich sytuacjach poszukiwane są rozwiązania pozwalające odebrać, przetworzyć i wygenerować bodźce z otoczenia w inny sposób niż ma to miejsce w przypadku poprawnego odbierania informacji przez człowieka. W przypadku zaburzeń układu optycznego oka, gdy pojawia się brak możliwości dostarczenia mózgowi informacji o otoczeniu, stosowane są nowoczesne technologie np.: implanty wewnątrzoczne, dzięki którym możliwa jest budowa obrazu (Shepherd et al., 2013). Podobną sytuację można zaobserwować w przypadku modułów obrazowania procesów w przemysłowych systemach monitorowania. Brak możliwości zastosowania standardowych technik obrazowania opartych np.: na kamerach CCD/CMOS wymusza użycie innego sposobu wizualizacji procesu. Zastosowanie systemów wizyjnych wykorzystujących moduły detektorów światła widzialnego ogranicza ich użycie przy analizie procesów przemysłowych, zazwyczaj odbywających się w zamkniętej, nieprzezroczystej instalacji. W przypadku prac badawczych, w środowisku laboratoryjnym, istnieje możliwość modyfikacji instalacji wprowadzając np.: sekcje przezroczyste. Obrazowanie to odbywa się jednak w otoczeniu znacząco odbiegającym od naturalnych warunków przemysłowych. Nie pozwala również na zobrazowanie wnętrza procesu, kiedy przepływające medium jest nieprzezroczyste. Przy takich uwarunkowaniach, rozwiązaniem pozwalającym na obrazowanie procesu są systemy tomografii procesowej

Grudzień Kt

(przemysłowej), dzięki którym możliwe jest zobrazowanie wnętrza procesu bez konieczności naruszania instalacji oraz w bezinwazyjny sposób pomiar jego aktualnego stanu (Williams and Jia, 2003)(Wang et al., 2018)(Yao and Takei, 2017)(Zhang et al., 2014).

W kontekście klasycznych narzędzi obrazowania, systemy tomografii procesowej cechuje przede wszystkim brak znaczącego ich wpływu na konstrukcję instalacji procesowej oraz możliwości jego kontroli w czasie rzeczywistym (Dyakowski and Jaworski, 2003)(York et al., 2011)(Ruuskanen et al., 2006)(Qiu and Primrose, 2016)(Smolik et al., 2017). Bez konieczności ingerencji w proces oraz w instalację przemysłową możliwa jest wizualizacja stanu procesu w formie obrazów tomograficznych i dostarczenie informacji o czasowo-przestrzennych zmianach stanu procesu (Mosorov, 2008)(Ostrowski et al., 1999)(Etuke and Bonnetaze, 1998)(Xue et al., 2012). Dodatkowo technika ta zdecydowanie lepiej uwidacznia zjawiska, zachodzące wewnątrz procesu przemysłowego, niż to ma miejsce w przypadku klasycznych rozwiązań. Ze względu na bogatą informację zawartą w obrazach tomograficznych ten rodzaj wizualizacji zyskuje coraz większą popularność w badaniach procesów przemysłowych (Banasiak et al., 2014)(WANG et al., 2016)(Rymarczyk et al., 2017). Wraz z systemami pomiarowymi opartymi na przetwarzaniu i analizie obrazów tomograficznych dostarczane są coraz to lepsze metody diagnozowania i kontroli procesów przemysłowych.

Zrekonstruowany, nieprzetworzony obraz tomograficzny nie zawsze stanowi kluczową informację o procesie w komputerowych systemach monitorowania jego przebiegu. Przestrzenno-czasowa informacja o procesie ukryta w obrazach tomograficznych wymaga dodatkowo dedykowanych algorytmów przetwarzania danych w celu odpowiedzi na pytania stawiane przez naukowców i inżynierów zajmujących się badaniem i kontrolą procesów przepływu (Mwambela and Johansen, 2001)(Rymarczyk et al., 2016) (Wang et al., 2005)(Williams, 1995). **Analiza i przetwarzanie obrazów tomograficznych umożliwia diagnozowanie stanu procesu przemysłowego, pozwalając na dogłębne i kompleksowe zbadanie zachodzących zjawisk fizyko-chemicznych.** Odpowiednia interpretacja pozyskanych informacji w czasie rzeczywistym pozwala, w razie potrzeby, dokonać odpowiednich modyfikacji nastaw regulatorów pracujących pod kontrolą modułów monitorowania procesami przemysłowymi. W tym kontekście istotnym jest również rozwój mocy obliczeniowej współczesnych systemów komputerowych. Zwiększa to możliwość wdrożeń opracowywanych metod przetwarzania danych w przemysłowych instalacjach procesowych (Kapusta, Banasiak, 2015). Otrzymane i przetworzone obrazy procesu stają się w ten sposób znaczącym elementem poprawy jakości nowoczesnych systemów monitorowania, diagnozowania i kontroli produkcji, jak również wspomagają prace projektowe nad coraz to lepszymi rozwiązaniami dotyczącymi konstrukcji układów przepływu.

Główny wkład prowadzonych przeze mnie badań naukowych w dziedzinie komputerowych systemów obrazowania procesów przemysłowych dotyczy z jednej strony opracowania narzędzi informatycznych umożliwiających lepsze zrozumienia i analizę procesów przepływu. Motywacją do podjęcia tego typu badania

było stwierdzenie Brown'a i Nielsen'a z 1998, mówiące o konieczności rozwijania nowych technik eksperymentalnych w celu zapewnienia „*bardziej wiarygodnych i kompletnych obserwacji, zwłaszcza w odniesieniu do wnętrza struktur materiałów sypkich*”. **Z drugiej strony opracowane i zaimplementowane przeze mnie, w przemysłowych systemach komputerowych, algorytmy akwizycji, przetwarzania i analizy obrazów tomograficznych dostarczają istotnej informacji, na temat stanu procesu przepływu dla potrzeb systemów kontroli.** Zaprojektowane systemy obrazowania procesów przemysłowych **pozwalają na wizualizację, pomiar oraz monitorowanie przepływu**, zdecydowanie zwiększając możliwości poznania zjawisk, występujących podczas procesu przepływu, w skali do tej pory niespotykanej. **Całość przeprowadzonych przeze mnie badań związana jest zarówno z projektowaniem, implementacją i weryfikacją nowatorskich algorytmów wizualizacji, w tym akwizycji danych, jak i algorytmami przetwarzania i analizy obrazów procesu.** Opracowane rozwiązania umożliwiają zobrazowanie i zrozumienie zjawisk zachodzących w czasie i przestrzeni podczas przepływów w wybranych procesach przemysłowych, pozwalając uzyskać efektywniejszy sposób ich monitorowania i kontroli.

6.1. Proces przepływu materiałów sypkich

Proces przepływu to pojęcie kojarzone zazwyczaj z przepływem substancji w fazie płynnej, ale obejmuje ono również przepływ gazów i materiałów sypkich. Pomiar gazów oraz cieczy jest tematem znanym od wielu lat (Azzopardi, 2006)(Falcone et al., 2002) (Kumar et al., 1995)(Banasiak et al., 2014)(Wajman et al., 2013)(Bertola, 2003)(Ahmed and Ismail, 2008)(Lucas et al., 2011)(Vieira et al., 2014). Obecnie uzyskiwane wyniki dostarczają wysoko-precyzyjnych systemów kontroli. Pomiar i zrozumienie przepływu materiałów w fazie stałej jest jednak zagadnieniem wymagającym zwiększonych prac badawczych i rozwojowych, szczególnie kiedy zróżnicowany rozkład gęstości materiału w trakcie przepływu komplikuje zagadnienie jego pomiaru (Santos et al., 2016)(Yan, 1996)(Tortora et al., 2006)(Dyakowski et al., 2000)(Goldschmidt et al., 2003)(Pouliquen et al., 2006). Znaczenie prac naukowych w tym zakresie związane jest z naturą materiałów występujących na różnych etapach produkcji, w których ponad 50% stanowią materiały sypkie (Seville et al., 2012)(Schulze, 2008). Przepływ materiałów sypkich obejmuje przemieszczanie się materiału w rurociągach lub w zbiornikach podczas ich załadunku/rozładunku oraz w poszczególnych etapach produkcji przemysłowej. Przed przystąpieniem do budowy systemów monitorowania stanu procesu w pierwszym kroku należy opracować sposób jego pomiaru, w tym generowania informacji wizyjnej o procesie, a następnie opracować metody przetwarzania zebranych danych. W taki schemat wpisują się **opracowane, zaimplementowane i zweryfikowane przeze mnie algorytmy dotyczące komputerowych metod obrazowania przepływu materiałów sypkich w skali przemysłowej oraz laboratoryjnej, jak i algorytmy przetwarzania i analizy danych obrazowych, dostarczające informacji o monitorowanym procesie w formie parametrów opisujących jego stan.** W prowadzonych przeze mnie badaniach metody wizualizacji procesu oraz przetwarzania danych zweryfikowane były

również w rzeczywistych, przemysłowych systemach transportu grawitacyjnego oraz pneumatycznego materiałów sypkich.

W zastosowaniach przemysłowych przechowywanie materiałów sypkich w silosach stosowane jest bardzo często, jako że większość materiałów użytych w produkcji przemysłowej ma postać granulatu. W przyrodzie występują one w tej postaci zarówno naturalnej, np. piaski, żwiry; lub są one do tej formy sprowadzane w procesie wydobywania, np. tłuczeń kamienny; jak również celowo przetwarzane, np. granulatu plastikowy. Proces składowania materiału sypkiego, z pozoru bardzo prosty, jest zagadnieniem złożonym i skomplikowanym w analizie. Od sposobu napełnienia silosu zależy jakość przechowywania materiału, jak również łatwość, efektywność oraz bezpieczeństwo jego opróżniania (Schulze, 2008)(Tejchman, 2013). Początkowa gęstość upakowania granulatu w zbiorniku, poziom naporu materiału na ściany, średnica ziaren, rozmiar i kierunek odkształceń systemów cząstek granulatu, wpływają na zmiany koncentracji materiału sypkiego w różnych obszarach zbiornika podczas jego rozładunku. Dodatkową trudnością w analizie przepływu stanowi wpływ zmian wielu czynników zewnętrznych, m. in. wilgotności czy temperatury, na zachowanie się materiału w procesie składowania i w trakcie rozładowywania zbiornika. W zakresie pomiaru procesu przetwarzania materiałów sypkich dobrze znane są systemy mierzące poziom przechowywanych materiałów w zbiornikach. Prowadzone badania, od wczesnych lat 60-tych, koncentrowały się głównie na przewidywaniu typu przepływu i zmianach w jego strukturach (Drescher et al., 2004)(Yang et al., 2011)(Michalowski, 1984), analizie wewnętrznych stref ścinania (Tejchman, 1998)(Wójcik et al., 2009), wyznaczeniu pól i prędkości przepływu oraz natężeniu opóźniania silosu (Steingart and Evans, 2005). Parametrami zmiennymi w opisywanych badaniach są geometrie zbiorników (kształt, struktura), właściwości materiału (wielkość i kształt cząstek, gęstość upakowania, współczynnik tarcia) i warunki zewnętrzne (temperatura, wilgotność). Pomiar zmian, w czasie i przestrzeni, poziomu koncentracji materiału w zbiorniku, mający wpływ zarówno na dokładność wyznaczenia prędkości i masy przepływu, jak i na bezpieczeństwo eksploatacji silosów, wymaga ciągłych prac rozwojowych. Podobnie ma się sytuacja z procesem transportu pneumatycznego materiału sypkiego w formie gęstej. **Proces ten również wymaga specjalistycznych systemów monitorowania, zapobiegających niepożądanym zjawiskom jak i poprawiających efektywność samego procesu** (Jaworski and Dyakowski, 2001)(Klinzing et al., 2010). Podczas transportu materiałów sypkich pojawiają się różnorodne problemy m.in. degradacja materiału lub/i systemu transportującego, blokada instalacji, czy ograniczenia przepustowości instalacji. Problemy te mogą wynikać z niedostosowania instalacji do właściwości przepływającego materiału sypkiego, niepoprawnej kontroli ciśnienia powietrza, ilości materiału podanego do transportu (Michaelides et al., 2016). Te nieprawidłowości powodują m.in. straty dodatkowej energii odblokowującej dany system przepływu, wytworzenie produktu o gorszej jakości czy konieczność częstych modernizacji instalacji. Szczególnie pomiar przepływów o burzliwym charakterze, określany jako przepływ turbulentny czy wirowy, wymaga znacznie bardziej złożonych metod przetwarzania danych niż ma to miejsce w przypadku przepływów laminarnych.

Niejednokrotnie zbyt niska dokładność pomiaru, spowodowana m.in. niejednorodnym i zmiennym w czasie rozkładem materiału podczas przepływu powoduje, że stosowane rozwiązania dostarczają wyników, których poprawa miałaby istotne znaczenie. Zazwyczaj stosowane metody pomiarowe bazują na jednorodnym rozkładzie materiału w trakcie transportu i często wymagają stałej prędkości przepływu. W przypadku, gdy znaczenie ma niejednorodny i zmienny w czasie rozkład materiału sypkiego metody te stają coraz mniej skuteczne. Najdokładniejsze narzędzia pomiarowe bazują na izotopach, emitujących niebezpieczne dla człowieka promieniowanie gamma (Hampel et al., 2007) i wymagających sporych nakładów kosztów przy ich zastosowaniu. W tym przypadku istnieją również ograniczenia dotyczące rozmiaru instalacji, w których odbywa się proces. **Dostarczenie obrazu rozkładu materiału do modułu monitorującego proces przemysłowy, z zastosowaniem metod bezpiecznych w użyciu, jest elementem koniecznym przy konstrukcji nowych, poprawiających skuteczność, systemów monitorowania.**

6.2. Metody obrazowania przepływów materiałów sypkich – stan wiedzy

Pojęcie obrazowania ma istotne znaczenie w kontekście badań procesów przemysłowych. Obraz, jak zostało podane w wielu pozycjach literaturowych (Williams and Beck, 1995)(Sideman and Hijikata, 1993), dostarcza danych o bogatej informacji o monitorowanym procesie. W przypadku wizualizacji procesu przepływów cieczy najczęściej spotykanymi systemami dostarczającymi obraz procesu są systemy optyczne, w tym m.in. kamery CCD/CMOS (Fiderek and Kucharski, 2011)(Wilmarth and Ishii, 1994) (Kaniowski et al., 2013). Systemy elektrycznej tomografii procesowej (Rząsa, 2010)(Banasiak et al., 2014)(Wajman et al., 2013), tomografii promieniowania gamma (Tjugum et al., 2002)(Hampel et al., 2007)(Sanneblad and Holmquist, 2006)(Johansen et al., 1996), rezonansu magnetycznego (Fukushima, 1999), tomografii promieniowania X (Bieberle et al., 2009)(Barthel et al., 2015), ultrasonografii (Chakraborty et al., 2009)(Figueiredo et al., 2016) znajdują również tu zastosowanie. Rozwiązania charakteryzujące się relatywnie niskimi kosztami implementacji, w porównaniu do zastosowań systemów opartych na promieniowaniu gamma, notujące znaczący udział przy obrazowaniu procesu przemysłowego, to techniki oparte o sygnał optyczny. Szczególnie systemy oparte o szybkie kamery CCD/CMOS są szeroko stosowane przy badaniach przepływu, przezroczystych dla sygnału optycznego, cieczy. Rozdzielczość czasowa tego typu obrazowania zaspakaja potrzeby wynikające z dynamiki procesu. Również wystarczająco dobrą rozdzielczością przestrzenną charakteryzują się otrzymywane z kamer obrazy przepływu. Należy być jednak świadom ograniczeniom tego typu systemów tylko do zastosowań, kiedy możliwy jest bezpośredni dostęp do widoku procesu. Zastosowanie sensorów sygnałów optycznych, np.: opartych na kamerach CCD/CMOS, wymusza przezroczystość sekcji pomiarowych, dodatkowo pozwala tylko na obrazowanie stref przyściennych, bez możliwości wizualizacji wnętrza procesu. W przypadku przepływów materiałów sypkich to ograniczenie ma istotne znaczenie. Ta niedogodność wyklucza użycie tego typu

Grudzień
2016

obrazowania, w większości przypadków, w środowisku przemysłowym. Mimo to w literaturze można znaleźć wiele prac badawczych, dotyczących również materiałów sypkich, przeprowadzonych przy pomocy kamer CCD/CMOS w warunkach laboratoryjnych. Takie rozwiązania pozwalają jedynie na analizę zachowania się materiału w warstwie przyściennej, a dopiero specjalna konstrukcja modelu silosu pozwala wnioskować na temat przepływu w całej jego objętości (Wójcik and Tejchman, 2009)(Lueptow et al., 2000)(Słominski et al., 2007)(Ostendorf and Schwedes, 2005). Dla tej metody badawczej najczęściej spotykaną metodą analizy danych, stosowaną przy analizie pola prędkości przepływu na bazie obrazów, są metody anemometrii obrazowej (*Particle Image Velocimetry* – PIV; *Particle Tracking Velocimetry*, PTV). Metody te opierają się na technikach korelacji obrazów cyfrowych (Rechenmacher and Finno, 2004). Główne wady systemów sygnałów w zakresie światła widzialnego, zostały wyeliminowane poprzez adaptację rozwiązań stosowanych w medycynie, opartych na obrazowaniu procesu za pomocą promieniowania X (Michalowski, 1984). Główną niedogodnością tego rozwiązania jest ograniczona prędkość zbierania danych, zazwyczaj mniejsza niż w przypadku poprzednich technik obrazowania, szczególnie przy dużej absorpcji promieniowania przez przepływający materiał. Choć w literaturze można znaleźć przykłady systemów rentgenowskich dostarczających obraz z częstotliwością tysiąca obrazów na sekundę (Bieberle et al., 2009) w przypadku obiektu badań, który w niewielkim stopniu osłabia promieniowanie rentgenowskie. Ten rodzaj pomiaru nie pozwala obrazować procesów odbywających się instalacja o dużych wymiarach, kiedy składnikami procesu są substancje o wysokiej absorpcji promieniowania. Z drugiej strony zdecydowanie dobrze odzwierciedla procesy odbywające się w laboratoryjnych modelach instalacji przemysłowych. **Na tle przedstawionego zagadnienia bardzo atrakcyjną alternatywą jest zastosowanie elektrycznej tomografii pojemnościowej ECT – jednego z rodzaju technik tomografii procesowej, dostarczającej w formie obrazu informacji o rozkładzie koncentracji materiału sypkiego w przestrzeni czujnika pomiarowego** (Yang and Peng, 2003)(Dyakowski and Jaworski, 2003). Jako nieinwazyjna technika wizualizacji procesu przemysłowego, zachodzącego wewnątrz zamkniętego, nieprzezroczystego obiektu bez naruszenia jego struktury, stanowi rozwiązanie znacząco wspierające prace nad rozwojem systemów obrazowania i pomiaru przepływu (Williams and Beck, 1995)(Scott and McCann, 2005)(Sikora and Sankowski, 2010)(Mi Wang, 2015). Tomografia procesowa jest stosunkowo młodą techniką pomiarową (Plaskowski et al., 1995), początki zawdzięcza stosowanej na dużą skalę, już od wielu lat, tomografii medycznej. Opiera się na zbieraniu sygnałów pomiarowych z czujników umieszczonych na granicy badanego obiektu i wizualizacji jego wewnętrznej struktury w postaci obrazu. Uzyskana informacja wizyjna przedstawia zjawiska fizyczne zachodzące wewnątrz urządzeń i aparatów przemysłowych (Plaskowski et al., 1995)(Mewes et al., 1997)(Hoyle et al., 2003). Proces wizualizacji rozkładu materiału w obszarze pomiarowym, poprzez przetworzenie danych pomiarowych i zastosowanie odpowiednich algorytmów, nosi nazwę rekonstrukcji obrazów tomograficznych (Xie et al., 1992)(Isaacson 1996) (Loser et al., 2001)(Warsito and Fan, 2003)(Lionheart, 2004) (Wajman, 2006). Zrekonstruowany obraz tomograficzny zawiera w istocie informację

Grudzień
Krzysztof

o rozkładzie parametru, na który czuły jest użyty system pomiarowy (jest to przenikalność dielektryczna w przypadku tomografii pojemnościowej, konduktywność w tomografii rezystancyjnej), w obszarze objętym czujnikiem. W związku z tym proces otrzymywania obrazu tomograficznego nazywany jest również procesem konstrukcji obrazu (Sikora, 2000). Istotną cechą tej techniki wizualizacji jest duża szybkość akwizycji danych pomiarowych, umożliwiającą osiągnąć kilkuset obrazów na sekundę, w sposób niezakłócający przebiegu procesu i bez konieczności kosztownego adoptowania instalacji przemysłowych. Możliwe jest obrazowanie przepływu zarówno w formie obrazu 2D (Loser et al., 2001)(Yang et al., 2003), jak i 3D (Wajman, et al. 2006)(Wang, et al. 2010)(Warsito and Fan, 2001). Należy mieć na uwadze, iż pomiar dla obrazowania 3D wymaga zdecydowanie dłuższego czasu akwizycji danych i rekonstrukcji obrazu. Powoduje to, że ten rodzaj obrazowania ogranicza swoje zastosowanie do przepływów o relatywnie niskiej dynamice, niezmieniający charakteru przepływu w trakcie pomiaru. Natomiast rozdzielczość przestrzenna otrzymanych wyników zdecydowanie odbiega od jakości jaką możemy zaobserwować w systemach stosujących kamery CCD/CMOS bądź systemy oparte na promieniowaniu X. Ostatnie prace badawcze w dziedzinie obrazowania procesów przemysłowych pokazują, że technika tomografii procesowej stanowi doskonałe narzędzie do wizualizacji stanu procesu zarówno w formie obrazów 2D jak i 3D (Wajman et al., 2013)(Banasiak et al., 2014)(Li et al., 2013)(Zhang et al., 2014).

Należy podkreślić fakt, że oprócz bezpośredniego zastosowania technik tomograficznych w systemach diagnostycznych, monitorowania oraz kontroli procesów przemysłowych, mogą one również służyć jak narzędzie wzbogacające wiedzę o procesie, przez co pośrednio wpływać na efektywniejsze projektowanie systemów monitorowania i kontroli. Są one źródłem bardzo cennej informacji dla celów badawczych, pozwalając zrozumieć szereg zjawisk fizycznych mających miejsce podczas eksperymentu naukowego czy testowania nowych rozwiązań inżynierskich. Należy mieć na uwadze, że otrzymany obraz procesu stanowi zazwyczaj pierwszy etap na drodze do otrzymania istotnych danych o stanie procesu. Zastosowanie metod przetwarzania i analizy obrazów tomograficznych pozwala wydobyć przestrzenno-czasową informację o charakterystycznych parametrach procesów przemysłowych, dostarczając nowego znaczenia dla wizualizacji zachowania się procesów przemysłowych.

W świetle przedstawionej charakterystyki zagadnień związanych z zastosowaniem technik tomograficznych w środowisku przemysłowym, wchodzące w zakres dorobku habilitacyjnego moje prace naukowe, dotyczą opracowania nowych rozwiązań przetwarzania danych pomiarowych wspomagających proces rekonstrukcji obrazu procesu przemysłowego oraz rozwijania algorytmów przetwarzania i analizy uzyskanych obrazów procesu. Zaproponowane rozwiązania sprzętowo-programistyczne, dotyczące obrazowania procesu przemysłowego, związane są zarówno z obliczeniami numerycznymi jak i algorytmami akwizycji danych pomiarowych pozwalających odtworzyć stan procesu przepływu materiałów sypkich w formie obrazu. Komputerowe systemy obrazowania zostały oparte o moduły pomiarowe elektrycznej tomografii pojemnościowej ECT. Opracowane algorytmy przetwarzania danych dotyczyły zarówno obrazów

pochożących z systemów tomografii promieni X oraz ECT. Celem badań, dotyczących systemów tomografii ECT, było przygotowanie systemów pomiarowych dostarczających informacji diagnostycznych o stanie procesu. Metody pomiaru były weryfikowane w pół-przemysłowym (*semi-industrial*) Laboratorium Tomografii Procesowej Politechniki Łódzkiej, a uzyskane wyniki analizowane, w ramach naukowej współpracy, z naukowcami zajmującymi się przechowywaniem i przepływami materiałów sypkich. W przypadku technik przetwarzania i analizy obrazów radiograficznych (zarówno 2D jak i 3D) promieni X, opracowane przeze mnie algorytmy służą jako narzędzie informatyczne dedykowane kompleksowym badaniom procesów przepływu materiałów sypkich.

6.3. Algorytmy akwizycji danych i konstrukcji obrazów ECT dedykowane przepływowi materiałów sypkich

Prace badawcze nad rozwojem tomograficznych systemów wizualizacji przemysłowej uwzględniają, oprócz rozwijania modułów pomiarowych (Yang, 2001)(Smolik et al., 2017) i konstrukcji dedykowanych czujników pomiarowych (Yang, 2010), również przetwarzanie danych pomiarowych, pozwalających na konstruowanie obrazu procesu (Yang and Peng, 2003)(Loser et al., 2001)(Smolik, 2010). W tym aspekcie moje prace związane były z modelowaniem i konstrukcją czujników ECT oraz **opracowaniem algorytmów akwizycji danych i rekonstrukcji obrazu procesu przepływu dla instalacji przemysłowych o unikalnej, w kontekście obrazowania ECT, skali.** W przypadku tomografii ECT prace te związane są z obliczeniami rozkładu pola elektrostatycznego wewnątrz czujnika pomiarowego (Wajman et al., 2006)(Wang et al., 2010)(Soleimani et al., 2009)(Warsito et al., 2007) i wyznaczaniem czułości pomiarowej czujnika (Loser et al., 2001)(Wajman and Banasiak, 2014). **Przeprowadzone przeze mnie badania, dotyczące metod przetwarzania zbioru wartości wektora pola elektrycznego wewnątrz czujników dużej skali, pozwoliły w pierwszym etapie prac zaproponować metodę oceny czujników ECT pod kątem możliwości ich zastosowania przy obrazowaniu, w pełnej skali, procesów przemysłowych** (Grudzień et al., 2011 - zał. 3.I.B. poz. 19). Zaproponowana komputerowa metoda analizy czujnika pomiarowego została przetestowana dla czujników 2D ECT, pozwalających na reprezentowanie proces w formie obrazu dwuwymiarowego, na podstawie obliczonych numerycznie, czułości pomiarowych wewnątrz czujnika z zastosowaniem metody elementów skończonych (ang. FEM). Obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone w środowisku programistycznym TomoKIS Studio (Banasiak, et al., 2010)(Wajman et al., 2014), opracowanym przez pracowników macierzystej jednostki Katedry Informatyki Stosowanej (obecnie Instytucie) Politechniki Łódzkiej. Zastosowanie zaproponowanego rozwiązania pozwala na wyznaczenie możliwie optymalnej konfiguracji elektrod czujnika ECT w kontekście procesu rekonstrukcji obrazu przepływu materiałów sypkich. Przeprowadzona analiza dotyczyła wpływu geometrii elektrod na czułość pomiarową w zakresie jej najwyższych wartości (dla przyległych elektrod) jak i najniższych (dla przeciwległych elektrod pomiarowych). Prace te zostały również poparte porównaniem wartości modelowanego

czujnika z wartościami uzyskanymi dla rzeczywistego, referencyjnego czujnika, przy zdefiniowanym wypełnieniu czujnika materiałem sypkim. **Prowadzone przeze mnie prace badawcze w tym zakresie mają szczególne znaczenie przy analizie modeli czujników ECT dedykowanych systemom monitorowania i kontroli procesów przepływu w zbiornikach o dużych gabarytach** (Grudzień et al., 2011 - zał. 3.I.B. poz. 19). Ocena projektu czujnika ma wtedy szczególne znaczenie, gdyż każda nieścisłość skutkować może zbyt dużą niedokładnością w obrazowaniu procesu. Przeprowadzone przeze mnie obliczenia numeryczne uwzględniały przestrzenny, trójwymiarowy, rozkład pola elektrostatycznego dla projektowanych czujników ECT. **Wynik prac pozwolił na opracowanie algorytmów akwizycji danych pomiarowych pozwalających zwizualizować proces przepływu materiału sypkiego w silosach o znaczącym rozmiarze instalacji przepływu materiałów sypkich w stosunku do innych prac naukowych** (Grudzień et al., 2012 - zał. 3.I.B. poz. 18)(Grudzień, 2017 - zał. 3.I.B. poz. 3). Zaprojektowane czujniki ECT pozwoliły zobrazować zmiany koncentracji materiału sypkiego zachodzące w czasie oraz przestrzeni w obszarze czujnika w trakcie rozładunku silosu. Wizualizacja tego procesu w formie obrazów 2D była możliwa przez zaimplementowanie przeze mnie algorytmu rozwiązującego zagadnienie odwrotne na bazie danych pomiarowych zebranych z konstruowanych czujników (o średnicy 0.7m i wysokości 5m). W przypadku pomiaru procesu opróżniania zbiornika o średnicy 1.5m, wymuszającego przepływ kominowy na materiale sypkim, **opracowałem autorski algorytm rekonstrukcji obrazu 3D rozkładu koncentracji materiału sypkiego z zastosowaniem innowacyjnego wielowarstwowego czujnika ECT dedykowanego obrazowaniu procesów przemysłowych** (Grudzień, 2017 - zał. 3.I.B. poz. 3). Algorytm, z pełnego wektora danych pomiarowych, wybiera wyliczony zestaw danych (zbiór znaczący). Kryterium przynależność do tego zbioru, podlegającego procesowi rekonstrukcji, odbywa się poprzez określenie progu zmian wartości pojemności między poszczególnymi parami elektrod podczas cyklu kalibracji czujnika. Podejście to pozwala obrazować proces odbywający się w zbiornikach o dużym rozmiarze, kiedy odległość między poszczególnymi elektrodami powoduje niejednoznaczność oceny zmian mierzonej wartości, występującą w klasycznych algorytmach rekonstrukcji. Zaproponowana przeze mnie metoda pozwala na rekonstrukcję obrazu procesu, choć niekoniecznie dostarcza pełen obraz przestrzeni przekroju zbiornika. **Opracowany algorytm został zaimplementowany i zweryfikowany w oparciu o nowatorskie rozłożenie elektrod w wielowarstwowym czujniku pomiarowym zlokalizowanym na obwodzie monitorowanego obiektu. Algorytm rekonstrukcji obrazu wymagała modyfikacji klasycznych rozwiązań, uwzględniając dane uzyskane w trakcie etapu wyodrębniania zbioru znaczącego.** Zaproponowane rozwiązanie zostało również nagrodzone na wystawach wynalazków i innowacji (zał. 3.K). Metoda charakteryzuje się szeroką użytecznością zastosowań z powodzeniem może być użyta do obrazowania w szerokim spektrum różnych procesów przemysłowych, a dodatkowo również badań stanu stacjonarnych obiektów. Jej zastosowanie może być również zaadaptowane do innych technik tomograficznych.

Innym elementem **prac badawczych związanych z rozwojem systemów wizualizacji procesów przemysłowych** były zaimplementowane przeze mnie



algorytmy rekonstrukcji obrazów, uwzględniające analizę zagadnienia prostego oraz odwrotnego, dedykowane czujnikom ECT do obrazowania procesów odbywających się, w odmiennych od klasycznych przypadków, zbiornikach o przekroju prostokątnym (Niedostatkiewicz, Grudzień et al., 2010 - zał. 3.I.B. poz. 12) (Grudzień et al., 2018 - zał. 3.I.B. poz. 2) (Grudzień et al., 2010 - zał. 3.I.B. poz. 17). Rezultatem przeprowadzonych w tym aspekcie prac było narzędzie do wizualizacji zjawisk występujących w procesie opróżniania zbiorników prostokątnych. Zaimplementowane przeze mnie algorytmy rozwiązujące zagadnienie proste, związane z obliczeniem poszczególnych map czułości czujnika, pozwoliły wyznaczyć rozmiar elektrod pomiarowych oraz macierz czułości projektowanych, prostokątnych, czujników ECT. Na bazie uzyskanych rezultatów zostały wykonane czujniki, a zebrane dane pomiarowe, pozwoliły zrekonstruować obraz procesu. **Otrzymane wyniki, przy pomocy opracowanego przeze mnie rozwiązania, pozwoliły przeanalizować zjawiska zachodzących podczas opróżniania zbiornika na podstawie zarówno danych pomiarowych jak i obrazu rozkładu przestrzennego materiału na różnych wysokościach silosu oraz dla różnych chwil czasu trwania procesu** (Niedostatkiewicz, Grudzień et al., 2010 - zał. 3.I.B. poz. 12). Dodatkowo opracowane przeze mnie algorytmy akwizycji danych oraz rekonstrukcji obrazu zostały również zweryfikowane poprzez porównanie otrzymanych wyników z wynikami uzyskanymi przy pomocy klasycznych technik wizualizacji. Porównanie to dotyczyło analizy obrazu w kontekście zmian rozkładu materiału w trakcie procesu przepływu. Dokonałem oceny jakości obrazowania ECT w stosunku do wyników uzyskanych przy pomocy kamery CMOS (Grudzień, et al., 2018 - zał. 3.I.B. poz. 2). W pracy przeprowadziłem badania wpływu parametru relaksacji w relacji do liczby iteracji algorytmu rekonstrukcji obrazu, w przypadku niewielkich zmian znormalizowanych wartości pomiarowych i ich wpływu na jakość obrazowania materiałów sypkich. Ma to istotny wpływ na kontrolę zbieżności iteracyjnych metod rekonstrukcji obrazów dla obrazowania przepływu grawitacyjnego oraz pneumatycznego materiałów sypkich. Ten rodzaj porównania dotyczył jakości odwzorowania stref przepływu w modelu silosu. Wyznaczenie obszaru strefy przepływu było możliwe dzięki opracowaniu algorytmu wyznaczenia strefy przepływu opartego o metodę aktywnych konturów.

Podsumowując tę część prac należy podkreślić, że opracowane przeze mnie algorytmy akwizycji danych i rekonstrukcji obrazu procesu zostały zastosowane do badania wpływu parametrów konstrukcji silosu oraz warunków zewnętrznych na zachowanie się struktur materiału sypkiego i jego monitorowanie w trakcie przepływu grawitacyjnego, zarówno dla obiektów o dużej skali jak i modeli obiektów o dedykowanych kształtach. **Zaproponowany algorytm obrazowania procesu przepływu, na bazie danych zebranych z wielowarstwowego czujnika pomiarowego, jako pierwsza pozwoliła zobrazować przepływ materiału sypkiego w tak dużej skali.** Do tej pory pomiar w podobnej skali był możliwy dla przepływu cieczy oraz po części dla rozrzedzonych struktur materiału w procesie fluidyzacji (Wang and Yang, 2011).

6.4. Przetwarzanie i analiza danych obrazowych ECT

Kolejnym z etapów prac badawczych były **opracowane przeze mnie metody analizy obrazów tomograficznych pozwalające monitorować dynamikę procesów w kontekście czasowo-przestrzennych zmian koncentracji materiału sypkiego**. Zrekonstruowane obrazy tomograficzne dostarczają informacji na temat przebiegu monitorowanego procesu. W tym aspekcie należy mieć na uwadze zmiany zachodzące zarówno w czasie trwania procesu jak i w obrazowanej przestrzeni czujnika. W przypadku analizy przepływu materiałów sypkich jednymi z istotnych informacji są wartości danych pomiarowych oraz pikseli zrekonstruowanego obrazu w poszczególnych chwilach czasu trwania procesu (Niedostatkiwicz, Grudzień et al., 2009 – zał. 3.I.B poz. 11). Ten element stanowi istotny fakt związany z określeniem stanu procesu przepływu grawitacyjnego oraz pneumatycznego materiałów sypkich, pozwalając systemowi kontroli na odpowiednią reakcję w przypadku wykrytych nieprawidłowości. Kluczowym przedmiotem analizy przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich są zjawiska dynamiczne, mające miejsce podczas opróżniania silosów. W przypadku grawitacyjnego przepływu masowego materiał sypki wchodzi w interakcję z konstrukcją silosu, powodując pojawianie się zjawisk dynamicznych (Tejchman, 2013). Powstające silne wibracje i pulsacje materiału są efektem rezonansu drgań konstrukcji silosu i samowzbudnych drgań w materiale sypkim. Ich pomiar pozwala na określenie stanu procesu i jego monitorowanie. **Prowadzone przeze mnie badania pozwoliły wypracować metodę analizy danych pomiarowych oraz obrazowych ECT, wyznaczającą charakterystykę dynamicznych pulsacji materiału w trakcie trwania procesu. Jej zastosowanie pozwala monitorować amplitudę oraz częstotliwość pojawiających się pulsacji.** Zaproponowane przeze mnie rozwiązanie uwzględniało m.in. analizę metod normalizacji danych pomiarowych oraz obrazowych pod kątem jakości wizualizacji opisywanych zjawisk. Ten element algorytmu przetwarzania danych pozwala zdecydowanie rozszerzyć użyteczność rozwiązania, poprzez dobór optymalnych parametrów normalizacji danych dedykowanych do monitorowanego procesu. Weryfikacja opracowanego algorytmu została przeprowadzona na bazie eksperymentów wykonanych dla różnych warunków przepływu. Otrzymane wyniki potwierdziły jej poprawność, potwierdzając przydatność opracowanej metody do monitorowania przepływów grawitacyjnych (Grudzień i inni, 2010 – zał. 5.I.B poz. 9). Dodatkowym elementem tych prac badawczych było określenie możliwości zwizualizowania niewielkich zmiany koncentracji materiałów sypkich w danych pomiarowych jak i obrazowych. Stanowisko pomiarowe, o specjalnej konstrukcji, umożliwiło przeprowadzenie eksperymentów dla tzw. przepływu kontrolowanego, stanowiącego zestaw danych referencyjnych. Dane pomiarowe, jak i zrekonstruowane obrazy, uzyskane podczas swobodnego przepływu zostały odniesione do danych referencyjnych. Takie rozwiązanie pozwoliło na wyznaczenie istotnego, z punktu widzenia monitorowania procesu, poziomu zmian danych tomograficznych. Kontynuacja tych badań, nad analizą zjawisk pulsacji i wibracji materiałów sypkich, została przeprowadzona przy użyciu krótkiej transformaty Fouriera oraz metody podziału obszaru obrazu na współosiowe okręgi (Rybak, Grudzień



et al., 2018 – zał. 3.I.B. poz. 1). Analiza w domenie częstotliwości pozwala na kompleksowe badanie i zrozumienie zmian sygnałów pomiarowych oraz obrazowych, jako odpowiedzi na zachodzące zjawiska dynamiczne w procesie opróżniania silosów.

W przypadku przepływów masowych istotny obszar monitorowania związany jest z obszarem przyściennym zbiorników, gdzie opisane zjawiska dynamiczne znacząco przybierają na sile. W wyniku zwiększenia szorstkości ścian silosów, strefa ścinania, pojawiająca się w przepływającym materiale sypkim, powoduje powstanie dodatkowych, poprzecznych sprężystych fal naprężeniowych, które podwyższają częstotliwość drgań materiału sypkiego i powodują odsunięcie się od częstotliwości drgań konstrukcji silosowej, a tym samym ograniczają zjawisko rezonansu. **Opracowany przeze mnie algorytm przetwarzania obrazów tomograficznych ECT pozwala na monitorowanie zmian objętościowych struktur materiału sypkiego, uwzględniających lokalizację odkształceń w postaci stref ścinania, będących efektem szorstkości ścian silosu.** Wprowadzona przeze mnie metoda określenia jednorodności obszarów obrazu, opierająca się na danych pomiarowych oraz obrazowych, dostarcza wartości progowej określającej przynależność do danego zbioru pikseli. Opracowany algorytm posiada parametr regularyzacji, którego wartości mogą być dobierane względem typu procesu, podlegającego monitorowaniu. **W przypadku przepływów materiałów sypkich algorytm dostarcza ilościowej oceny strefy ścinania oraz poziomu koncentracji materiału w kluczowym, dla bezpiecznej eksploatacji, obszarze silosu** (Grudzień et al., 2012 – zał. 3.I.B. poz. 8). **Innowacyjny sposób określenia stanu procesu stosowany jest przede wszystkim do badania wpływu parametrów silosu smukłego na proces rozładunku** (Niedostatkiwicz, Grudzień et al., 2009 – zał. 3.I.B. poz. 11), pozwalając ocenić szerokość lokalizacji strefy ścinania wzdłuż ścian silosu i jej wpływ na siłę naporu materiału na ściany zbiornika w poszczególnych chwilach procesu.

Przeprowadzone badania, związane z zastosowaniem opracowanych przeze mnie algorytmów przetwarzania i analizy obrazu ECT, dostarczyły wyników, pozwalających zarówno uzyskać dogłębniejszą wiedzę na temat zjawisk zachodzących podczas procesu przepływu jak i wypracować sposobu monitorowania zjawisk dynamicznych odbywających się w strukturach materiału sypkiego podczas masowego przepływu grawitacyjnego. Opisane metody przetwarzania i analizy obrazów ECT dostarczają opisu mechanizmu powstawania efektów dynamicznych, poprzez detekcję propagacji zmian koncentracji materiału sypkiego w chwili rozpoczęcia opróżniania silosu, jak również pozwalają na monitorowanie stanu procesu w trakcie jego trwania.

Oprócz metod przetwarzania obrazów przestrzennych, uwzględniających informacje o procesie z pojedynczego obrazu, moje prace związane były również z rozwijaniem algorytmów przetwarzania sekwencji obrazów ECT, biorących pod uwagę również aspekt czasowych zmian wartości pomiarowych. Wspomniana już metoda oparta na analizie krótkiej transformaty Fouriera wpisuje się bezpośrednio w ten trend (Rybak, Grudzień et al. 2018 – zał. 3.I.B. poz. 1), gdzie przetwarzanie danych jest wykonywane w założonym przedziale czasu, z określoną liczbą obrazów. Systemy tomografii procesowej, zwłaszcza oparte na pomiarze własności elektrycznych (w tym ECT),

charakteryzują się wysoką rozdzielczością czasową. Liczba obrazów procesu jakie można uzyskać w ciągu sekundy zdecydowanie przewyższa liczbę obrazów tomograficznych otrzymywanych w klasycznych tomografach medycznych. Stąd **opracowane przeze mnie algorytmy przetwarzania obrazów ECT uwzględniają również analizę czasową zmian rozkładu koncentracji materiałów sypkich w trakcie monitorowanego procesu przepływu grawitacyjnego o charakterze kominowym** (Grudzień et al., 2008 – zał. 3.I.B. poz. 13). **Metoda analizy sekwencji obrazów tomograficznych, w oparciu o analizę szeregów czasowych i teorię procesów stochastycznych, zdefiniowanych przez uszeregowane wartości pikseli, pozwala monitorować pierwszy etap przepływu kominowego w trakcie opróżniania silosu.** Opracowany przeze mnie algorytm, operujący na rozpoznawaniu charakterystycznych punktów funkcji autokorelacji oraz wariancji szeregów czasowych, dostarcza do systemu monitorowania informację o dynamice formowania się komina przepływu. Ten rodzaj przepływu występuje w odmiennych konstrukcjach silosowych, niż to ma miejsce w przypadku przepływu masowego i wymaga bardziej kompleksowych systemów kontroli. Dla opracowanej metody danymi wejściowymi są pełne sekwencje zrekonstruowanych obrazów ECT. **Opisywany algorytm przetwarzania i analizy sekwencji obrazów tomograficznych umożliwia kontrolę procesu formowania się strefy przepływu, odbywającego się podczas rozładunku silosów dedykowanych przepływowi kominowemu. Dzięki autorskiemu rozwiązaniu możliwe stało się zastosowanie jednopłaszczyznowego czujnika ECT, do monitorowania zmian czasowo-przestrzennych procesu przepływu.**

Połączenie informacji na temat zmian przestrzennych jak i czasowych stanu procesu, jaka dostarczana jest wraz z sekwencją obrazów tomograficznych ECT, został również uwzględniony w moich pracach związanych z wyznaczaniem poszczególnych składowych prędkości przepływu o naturze turbulentnej (Ayoub, Grudzień et al., 2016 – zał. 3.I.B. poz. 4). Przepływ ten charakteryzuje się znacząco różnym wzorcem ruchu materiału niż ma to miejsce w przypadku uporządkowanych, laminarnych przepływów. **Opracowany algorytm opierający się na korelacji czasowo-przestrzennej danych obrazowych umożliwia wyznaczenie kątowej oraz osiowej składowej prędkości. Jest on rozwinięciem metody wirtualnych kanałów i zastosowania teorii procesów stochastycznych do analiz danych ECT, opracowanych przeze mnie w trakcie doktoratu.** W tym aspekcie moje prace, oprócz zadań związanych z opracowaniem algorytmu przetwarzania obrazów, dotyczyły bezpośrednio prac projektowych nad sekcją pomiarową oraz rekonstrukcją obrazów. Wyniki tej część badań pozwoliły zarówno opracować metodę wyznaczania składowych wektora prędkości na bazie systemów ECT jak i określić kryterium doboru odległości między dwoma płaszczyznami pomiarowymi. Opracowane rozwiązanie zweryfikowane zostało na przygotowanym modelu przepływu wirowego oraz na podstawie danych pomiarowych zebranych podczas grawitacyjnego przepływu, o charakterze turbulentnym, materiałów sypkich. Końcowym efektem prac była również rozprawa doktorska Ayoub'a Saoud'a, którego byłem opiekunem pomocniczym.

6.5. Przetwarzanie i analiza obrazów promieniowania rentgenowskiego procesów przemysłowych

Opracowane przeze mnie algorytmy przetwarzania i analizy obrazów procesów przemysłowych, uzyskanych za pomocą tomografu promieni X, dotyczyły dwóch głównych nurtów prac badawczych. Z jednej strony uzyskana informacja miała na celu ocenę i wzbogacenie systemów tomografii ECT o wiedzę dotyczącą jakości obrazowania procesów przemysłowych. Z drugiej strony wyniki prac związane były bezpośrednio z opracowaniem metod wyznaczania charakterystycznych parametrów procesu i ich wizualizacji.

Istotnym zagadnieniem, które występowało podczas analizy danych ECT, była dokładność obrazowania procesów pod kątem poziomu koncentracji materiałów w różnych obszarach instalacji. Na tym polu przeprowadziłem serie badań pozwalające wyznaczyć jakości obrazowania ECT. Opracowana przeze mnie metodyka pomiarowa opierała się na porównaniu wyników obrazowania ECT oraz promieni X (Grudzień et al., 2012 – zał. 3.I.B. poz. 7). Zastosowane rozwiązanie umożliwiło pomiar procesu, w tych samych warunkach, przy pomocy obu systemów obrazowania. Zastosowane algorytmy przetwarzania obrazów tomograficznych, w tym normalizujące oraz dopasowujące dane, pozwoliły przeprowadzić analizę porównawczą obu systemów obrazowania. **W opracowanej metodzie dane radiograficzne stanowiły obraz referencyjny, który dostarczał informacji o rzeczywistych zmianach stanu procesu przepływu materiałów sypkich. W tym celu konieczne było odzwierciedlenie przestrzeni pomiarowej systemów ECT w obrazach radiograficznych. Dopasowanie obrazów oparte zostało na nałożeniu obszaru pomiarowego czujnika ECT na obszary obrazu radiograficznego oraz ujednoliceniu zakresu wartości pikseli obrazów obu systemów. Analizie podlegał pełen zakres zmian czasowych stanu procesu.** Wyznaczenie współczynników korelacji między sekwencjami pomiarowymi ECT oraz promieni X dostarczyły informacji o jakości odwzorowania stanu procesu przy pomocy systemów ECT w poszczególnych etapach procesu przemysłowego. Wynik porównania pozwala na określenie współczynnika korygującego w systemie monitorowania on-line procesów przepływu z zastosowaniem szybkiej techniki pomiarowej ECT. Dokładności systemów ECT zarówno pod kątem rozdzielczości obrazowania jak i odwzorowania w formie wartości pikseli poziomu koncentracji materiału w poszczególnych strefach przepływu stanowi istotny element interpretacji i analizy danych ECT. Odpowiednia korekta danych umożliwi również m.in. poprawę dokładności obliczeń masy przepływu w systemach transportu materiałów sypkich.

Wynik przetwarzania obrazów tomograficznych ECT stanowi zazwyczaj zbiór charakterystycznych parametrów opisujących stan procesu lub sposób jego wizualizacji. Określenie stanu procesu pozwala na odpowiednią jego kontrolę bądź analizę wpływu zewnętrznych czynników na zachowanie się przepływającego medium, podczas badań nad rozwiązaniami poprawiającymi efektywność i bezpieczeństwo pracy systemów przemysłowych. Jednak należy mieć na uwadze, że rozdzielczość przestrzenna obrazów ECT jest mocno ograniczona, a w przypadku prac badawczych większe znaczenie przypisywane jest analizie danych, służącej unowocześnianiu systemów przepływu, niż

monitorowaniu on-line procesu w warunkach przemysłowych. W celu precyzyjniejszego, niż ma to miejsce w przypadku ECT, wyznaczenia wartości charakterystycznych parametrów procesów i ich wizualizacji opracowałem metodę obrazowania procesu przepływu oraz przetwarzania obrazów, opierając się na informacji pochodzącej z systemów tomograficznych promieni X (Grudzień et al., 2011 – zał. 3.I.B. poz. 10) (Grudzień, 2012 – zał. 3.I.B. poz. 20). Systemy tomografii X cechuje zdecydowanie wyższa rozdzielczość przestrzenna niż czasowa. Dla tego typu obrazowania opracowane przeze mnie algorytmy przetwarzania obrazów uwzględniają zarówno wiedzę na temat powstawania obrazu radiograficznego jak i własności uzyskanych obrazów cyfrowych (Grudzień, 2014 – zał. 3.I.B. poz. 20). Zaproponowana metoda przetwarzania obrazów radiograficznych oparta jest na analizie wartości współczynników pochłaniania promieniowania X przedstawianego w formie obrazu 2D. Do opisu ilościowego zmian parametrów procesu, odbywającego się w instalacji, konieczna jest filtracja danych obrazowych eliminujących wpływy ścian instalacji na budowę obrazu radiograficznego wewnętrznej struktury procesu. Promieniowanie odbierane przez detektor zależne jest zarówno od współczynnika pochłaniania promieniowania jak i od długości drogi jaką wiązka fotonów przebędzie przez badaną próbkę na drodze między źródłem a detektorem. Ma to znaczący wpływ w przypadku tomografu, o źródle formującym wiązkę stożkową. Nawet w przypadku jednorodnego obiektu otrzymany radiogram wykazuje większe wartości promieniowania w części środkowej obrazu. W tym celu opracowałem algorytm normalizacji obrazów radiograficznych, która pozwala wyeliminować wpływ ścian instalacji procesu oraz uniezależnić wartość pikseli obrazu od długości drogi przebytej przez wiązkę fotonów (Grudzień, 2014 – zał. 3.I.B. poz. 16). Efekt normalizacji danych umożliwia przeprowadzenie analizy porównawczej różnych partii badanego obiektu. Zaproponowane poszczególne etapy przetwarzania obrazów radiograficznych pozwalają poprawić jakość obrazowania procesu, bez utraty informacji o rzeczywistych zmianach koncentracji materiału sypkiego w różnych obszarach silosu, uwypuklając zjawiska w sposób zdecydowanie bardziej widoczny niż dotychczas. Dzięki temu możliwe było badanie wpływu własności konstrukcji zbiorników oraz początkowego upakowania materiału sypkiego na charakterystykę przepływu, określając rozmiar i poziom koncentracji poszczególnych stref przepływu - strefa ścinania, stagnacji, obszar komina przepływu, (Babout, Grudzień et al., 2013 – zał. 3.I.B. poz. 6). Opracowany algorytm wyznaczania parametrów poszczególnych obszarów struktur materiału uwzględniał informację o czasowych zmianach stanu przepływu oraz operacje morfologiczne przeprowadzane na analizowanym obrazie radiograficznym. W przypadku scharakteryzowania strefy ścinania opracowany przeze mnie algorytm segmentacji obrazu został również przeprowadzony z uwzględnieniem logarytmicznej zależności tłumienia promieniowania rentgenowskiego (Grudzień, 2015 – zał. 3.I.B. poz. 16). Nie jest to pierwsze zastosowanie technik radiacyjnych do badań deformacji struktur materiału sypkiego, określanych jako strefa ścinania. Badania w większości dotyczyły zastosowania technik radiacyjnych do analizy statycznych rozkładów materiałów sypkich (Caulkin et al., 2009), analizy tłumienia promieniowania (Busignies et al., 2006) (Selomulya et al., 2005)(Suzuki et al., 2008), rozkładu wilgoci w porowatym

*Grudzień
Krzysztof*

środowisku (Roels and Carmeliet, 2006), jak również pomiarze deformacji materiału sypkiego w mikroskali (Andò et al., 2012), analizy zależności strefy ścinania oraz zmian gęstości materiału przy zmianach pozycji cząstek granulatu w urządzeniach ścinających (Kabla and Senden, 2009), czy wizualizacji stref w występujących przepływu za pomocą obrazów radiograficznych (Michalowski, 1984) (Grantham and Forsberg, 2004). Z punktu widzenia prowadzonych przeze mnie prac najistotniejsze elementy dotyczą metod przetwarzania i analizy obrazów, przekazujących do systemów kontroli parametrycznego opisu procesu przemysłowego. **Opracowane przeze mnie algorytmy dostarczają ilościowego, parametrycznego, opisu zachodzących zmian w koncentracji materiału podczas procesu opróżniania silosu. Dzięki temu możliwe jest także obszerne badanie procesu przepływu na podstawie obrazów radiograficznych.**

Oprócz przetwarzania obrazów radiograficznych również opracowywałem algorytmy dedykowane przetwarzaniu i analizie obrazów 3D. Wykonane przeze mnie stanowisko eksperymentalne pozwala również na obrazowanie przepływu materiałów sypkich w formie obrazów tomograficznych 3D (Waktola, Grudzień et al., 2016 – zał. 3.I.B. poz. 15). Zaprojektowany algorytm przetwarzania obrazu 3D dostarcza wiedzy na temat kształtu obszaru silosu zajmowanego przez tworzący się w trakcie procesu komin przepływu. Jednym z etapów budowy obrazu strefy przepływu była wyznaczenie wartości gradientu jasności pikseli obrazu tomograficznego, określającego granicę dwóch oddzielnych obszarów. **Opracowany przeze mnie algorytm liniowej filtracji zbioru pikseli umożliwił automatyczne wyznaczenie punktów granicznych w poszczególnych przekrojach obrazu 3D wzdłuż całej wysokości badanego obiektu.** Rozwiązanie to pozwala na badanie wpływu wielu parametrów silosu na zachowanie się materiału w różnych jego strefach z uwzględnieniem pełnego obrazowania trójwymiarowego.

W celu lepszego zrozumienia zjawisk zachodzących w trakcie opróżniania modeli silosów zaproponowałem również algorytm przetwarzania obrazów dedykowany śledzeniu cząstek znacznikowych wymieszanych z materiałem sypkim. Odpowiednie śledzenie pozycji cząstki na obrazach radio- i tomograficznych dostarcza wartościowych informacji o procesie. Na bazie otrzymanych informacji o wektorze ruchu pojedynczych cząstek można wnioskować na temat zachowania się całej struktury przepływu. **Opracowana przeze mnie metoda wyznaczania położenie cząstek znacznikowych w obrazach tomograficznych, dostarcza informacji o przestrzennej lokalizacji cząstek w obrazie struktur materiałów sypkich** (Grudzień et al., 2013 – zał. 3.I.B. poz. 14). W oparciu o wiedzę a priori dotyczącą rozmiaru, kształtu oraz współczynnika pochłaniania promieniowania X przez cząstkę znacznikową możliwe jest wyznaczenie jej pozycji w poszczególnych obrazach 3D. Przetwarzanie obrazu oparte zostało na kaskadowym algorytmie klasyfikacji pikseli do zbioru elementów cząstek znacznikowych, uwzględniającym wspomniane cechy szukanych obiektów. Poszczególne etapy algorytmu uwzględniały binaryzację obrazu oraz operacje morfologiczne, wspomagane interakcją użytkownika. Uzyskane pozycje poszczególnych cząstek znacznikowych, osadzonych w materiale sypkim, pozwalają na określenie ścieżek poruszania się struktur materiału między kolejnymi obrazami 3D. **W celu**

powiązania ze sobą pozycji tej samej cząstki na kolejnych obrazach zaproponowałem algorytm minimalno-odległościowy, który wyszukuje cząstki w kolejnej chwili czasu położonej najbliższej wyznaczonej cząstki znacznikowej. W przypadku znaczących zmian w położeniu cząstek, pomiędzy poszczególnymi obrazami tomograficznymi, konieczne jest śledzenie cząstek na bazie sekwencji obrazów radiograficznych. W tym celu, we współpracy z naukowcami zajmującymi się dziedziną interakcji człowiek-komputer, został opracowany system informatyczny, dedykowany szerokiej grupie ludzi (*crowdsourcing*), pozwalający dokonać analizy obrazów przy pomocy wielu użytkowników systemu (Chen, Grudzień et al., 2016 – zał. 3.I.B. poz. 5). Zadaniem przewidzianym dla użytkowników systemu było ręczne odnajdywanie cząstek znacznikowych w obrazach. Zebrane, uśrednione wyniki, dostarczają pozycji szukanych na obrazie 2D radiograficznym cząstek, których odnalezienie znanymi metodami przetwarzania obrazów nie było możliwe. Moje dokonania w tym zakresie dotyczyły wstępnego przetwarzania zestawów obrazów, opierających się na opracowanym algorytmie normalizacji danych radiograficznych, w celu poprawy ich jakości, dla potrzeb użytkowników systemu, oraz opracowaniu koncepcji rozwiązania udziału użytkownika w procesie analizy obrazów (Grudzień and Torre Hernandez, 2013 - zał. 3.I.B poz. 14). Efektem prac była możliwość śledzenia położenia cząstki znacznikowej na obrazach radiograficznych, uzyskanych w czasie procesu, między poszczególnymi obrazami trójwymiarowymi. Dzięki czemu śledzenie cząstek znacznikowych mogło się również odbyć na bazie trudnych w analizie obrazach radiograficznych.

Podsumowanie

Przedstawione w autoreferacie moje dokonania naukowe są bezpośrednio związane z nieinwazyjnymi technikami obrazowania wybranych procesów przemysłowych. W ramach doskonalenia metod wizualizacji oraz algorytmów przetwarzania i analizy informacji wizyjnej opracowywałem algorytmy i metody służące jako narzędzie do lepszego zrozumienia zjawisk występujących w trakcie procesu przemysłowego oraz elementy modułów monitorujących ich stan. Technikami pomiarowymi stosowanymi w przeprowadzonych badaniach były systemy elektrycznej tomografii procesowej ECT, tomografii promieni X oraz kamer CMOS. Istotnym elementem prac badawczych był współpraca z ośrodkami krajowymi (m.in. z Politechniką Gdańską) oraz międzynarodowymi (*University of Manchester, INSA Lyon*), dzięki której możliwa była weryfikacja opracowywanych rozwiązań, a także ocena ich przydatności. Użyteczność opracowanych przeze mnie metod została potwierdzona przez naukowców zajmujących się badaniami procesów przepływu materiałów sypkich (*Katedra Budownictwa i Inżynierii Materiałowej Politechniki Gdańskiej*). Prace związane z opracowywaniem algorytmów przetwarzania obrazów z systemów tomografii X zostały wykonane w oparciu o dane uzyskane w laboratorium *Obrazowania Rentgenowskiego Henry Moseley'a w Uniwersytecie w Manchester* oraz w laboratorium tomografii MATEIS w *INSA Lyon*. Opracowywanie i weryfikację nowych rozwiązań obrazowania ECT przeprowadziłem w przemysłowym *Laboratorium Tomografii Procesowej im. Tomasza*



Dyakowskiego w Instytucie Informatyki Stosownej Politechniki Łódzkiej we współpracy z naukowcami z grupy TomoKIS tego Instytutu. Wyposażenie laboratorium oraz pół-przemysłowe instalacje procesowe pozwoliły zweryfikować innowacyjne metody wizualizacji w skali przemysłowej. Należy także podkreślić, że wyniki prowadzonych prac badawczych były nagradzane na wielu międzynarodowych wystawach innowacji i wynalazczości (zał. 3.II.K). Osiągnięte przeze mnie rezultaty dostarczają narzędzi do lepszego zrozumienia procesów przepływu jak również rozszerzają potencjał zastosowania technik wizualizacji przemysłowych. Główny wkład moich prac w dziedzinę Informatyki dotyczy rozwoju zagadnień informatycznych w systemach tomografii procesowej, w tym przede wszystkim:

- opracowania algorytmów wyznaczania parametrów procesów przemysłowych na bazie czasowo-przestrzennej sekwencji danych obrazowych;
- opracowania algorytmów akwizycji danych pomiarowych dedykowanych obrazowaniu procesów przemysłowych dużej skali;
- opracowania metodyki analizy obrazów procesów przemysłowych z zastosowaniem algorytmów śledzenia znaczników z uwzględnieniem kaskadowego algorytmu rozpoznawania obiektów oraz interakcji z użytkownikiem;
- opracowania algorytmu segmentacji obrazu procesu z uwzględnieniem procesu budowy obrazu radiograficznego oraz skalowania danych.

Swoje blisko 20-letnie doświadczenia (w tym także zapoczątkowane pracą magisterską) związane z tematyką przetwarzania i analizy obrazów przekazuje teraz studentom oraz doktorantom, prowadząc prace dyplomowe oraz pełniąc funkcje promotora pomocniczego w dwóch rozprawach :

1. Saoud Ayuob, „*Flow velocity measurement algorithms based on spatial-temporal correlation analysing of ECT tomography images*” obrona w dniu 12.17.2017.
2. Selam Waktola, „*Three-dimensional image processing methods to investigate structural changes of granular materials during gravitational flow based on X-ray tomography data*” przewód otwarty w dniu 13.06.2017.

Obecnie moje prace koncentrują się nad wdrożeniem rozwiązań opartych na technikach tomograficznych w środowisku przemysłowym. Uczestniczę, jako główny wykonawca – w roli eksperta ds. algorytmiki, w projekcie o tytule „*Nowa generacja platformy tomografii przemysłowej do diagnostyki i sterowania procesami technologicznymi*”, finansowanym przez z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach konkursu 1/4.1.2/2017 „Regionalne agendy naukowo-badawcze”. Projekt dotyczy budowy wielomodalnego systemu pomiarowego, skupiającego różne techniki pomiaru i wizualizacji przepływów oraz metody analizy dużych zbiorów w wirtualnych przestrzeniach obliczeniowych.

Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze

Oprócz prac naukowych bezpośrednio związanych z zastosowaniem i rozwojem systemów obrazowania procesów przemysłowych moje prace związane są z badaniami dotyczącymi interakcji w systemach człowiek-komputer. Na tym polu, znajomość zagadnień związanych z pomiarem pojemności elektrycznej oraz analizy obrazów, pozwala na opracowywanie innowacyjnych rozwiązań. Wynik tej działalności ma również znaczenie w przypadku rozwoju systemów monitorowania i kontroli procesów w warunkach przemysłowych. Opracowywanie nowoczesnych elementów interakcji człowiek-maszyna, uwzględniających rzeczywistość rozszerzoną oraz wirtualną, pozwala znacząco poprawić efektywność pracy oraz bezpieczeństwo osób i środowiska, znajdującego się w najbliższym sąsiedztwie. Prace badawcze są prowadzone również pod moją opieką m.in. w studenckim kole naukowym *UbiCOMP* zorganizowanym w *Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej*.

Ponadto moje prace skupiają się na opracowaniu rozwiązań programistycznych wspomagających pracę służb śledczych. Uczestniczę w zespole ściśle współpracującym z *Centralnym Laboratorium Kryminalistycznym Policji* w ramach projektu „Opracowanie oprogramowania do akwizycji danych cyfrowych” finansowanym ze środków z *Programu Krajowego Funduszu Bezpieczeństwa Narodowego PL/2017/PR/0015*. W ramach przedsięwzięcia rozwijane jest oprogramowanie do analizy danych cyfrowych, pozwalające w nowatorski sposób przeglądać zawartość dużych zbiorów danych. Projekt realizowany jest w formie partnerstwa innowacyjnego, a wynik prac będzie stanowił bazę działania *Komendy Głównej Policji* przy wyszukiwaniu śladów przestępstw. Innym elementem współpracy ze służbami Policji, są rozwijane przy moim współudziale, systemy jezdne wspomagające czynności służb mundurowych podczas inspekcji oraz nadzoru podejrzanych pojazdów.

Literatura

- Ahmed, W.H., Ismail, B.I., 2008. Innovative Techniques For Two-Phase Flow Measurements. Recent Patents Electr. Eng. 1, 1–13.
- Andò, E., Hall, S.A., Viggiani, G., Desrues, J., Bésuelle, P., 2012. Grain-scale experimental investigation of localised deformation in sand: a discrete particle tracking approach. Acta Geotech. 7, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11440-011-0151-6>
- Azzopardi, B., 2006. Gas-liquid Flows. Begell House, New York.
- Banasiak, R., Jaworski, T., Wajman, R., 2010. Aplikacja dla potrzeb kompleksowego przetwarzania tomograficznych danych pomiarowych - TomoKIS Studio. Zesz. Nauk. Elektr. 121, 145–158.
- Banasiak, R., Wajman, R., Jaworski, T., Fiderek, P., Fidos, H., Nowakowski, J., Sankowski, D., 2014. Study on two-phase flow regime visualization and identification using 3D electrical capacitance tomography and fuzzy-logic classification. Int. J. Multiph. Flow 58, 1–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.07.003>
- Barthel, F., Bieberle, M., Hoppe, D., Banowski, M., Hampel, U., 2015. Velocity measurement for two-phase flows based on ultrafast X-ray tomography. Flow Meas. Instrum. 46, 196–203. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2015.06.006>
- Bertola, V., 2003. Two-Phase Flow Measurement Techniques, in: Bertola, V. (Ed.), Modelling and Experimentation in Two-Phase Flow. Springer Vienna, Vienna, pp. 281–323. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2538-0_6
- Bieberle, M., Fischer, F., Schleicher, E., Koch, D., Menz, H.-J., Mayer, H.-G., Hampel, U., 2009. Experimental two-phase flow measurement using ultra fast limited-angle-type electron beam X-ray computed tomography. Exp. Fluids 47, 369. <https://doi.org/10.1007/s00348-009-0617-6>
- Busignies, V., Leclerc, B., Porion, P., Evesque, P., Couarraze, G., Tchoreloff, P., 2006. Quantitative

- measurements of localized density variations in cylindrical tablets using X-ray microtomography. *Eur J Pharm Biopharm* 64, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2006.02.007>
- Caulkin, R., Jia, X., Xu, C., Fairweather, M., Williams, R.A., Stitt, H., Nijemeisland, M., Aferka, S., Crine, M., Léonard, A., Toye, D., Marchot, P., 2009. Simulations of Structures in Packed Columns and Validation by X-ray Tomography. *Ind. Eng. Chem. Res.* 48, 202–213. <https://doi.org/10.1021/ie800033a>
- Chakraborty, S., Keller, E., Talley, J., Srivastav, A., Ray, A., Kim, S., 2009. Void fraction measurement in two-phase flow processes via symbolic dynamic filtering of ultrasonic signals. *Meas. Sci. Technol.* 20, 23001.
- Crowe, C.T., 2005. *Multiphase Flow Handbook*. Taylor & Francis Group, London.
- dos Santos, E.N., Schleicher, E., Reinecke, S., Hampel, U., Silva, M.J. Da, 2016. Quantitative cross-sectional measurement of solid concentration distribution in slurries using a wire-mesh sensor. *Meas. Sci. Technol.* 27, 15301.
- Drescher, A., Ferjani, M., 2004. Revised model for plug/funnel flow in bins. *Powder Technol.* 141, 44–54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.powtec.2004.02.011>
- Dyakowski, T., Jaworski, A.J., 2003. Non-Invasive Process Imaging – Principles and Applications of Industrial Process Tomography. *Chem. Eng. Technol.* 26, 697–706. <https://doi.org/10.1002/ceat.200390107>
- Dyakowski, T., Jeanmeure, L.F.C., Jaworski, A.J., 2000. Applications of electrical tomography for gas–solids and liquid–solids flows — a review. *Powder Technol.* 112, 174–192. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(00\)00292-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0032-5910(00)00292-8)
- Etuke, E.O., Bonnecaze, R.T., 1998. Measurement of angular velocities using electrical impedance tomography. *Flow Meas. Instrum.* 9, 159–169. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0955-5986\(98\)00020-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0955-5986(98)00020-X)
- Falcone, G., Hewitt, G.F., Alimonti, C., Harrison, B., 2002. Multiphase flow metering: Current trends and future developments. *J. Pet. Technol.* 54, 77–84.
- Fiderek, P., Kucharski, J., 2011. A Computer Vision System for On-Line Two-Phase Gas-Liquid Flows Recognition Using Fuzzy Methods. *Automatyka* 15, 505–519.
- Figueiredo, M.M.F., Goncalves, J.L., Nakashima, A.M. V, Fileti, A.M.F., Carvalho, R.D.M., 2016. The use of an ultrasonic technique and neural networks for identification of the flow pattern and measurement of the gas volume fraction in multiphase flows. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 70, 29–50. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.08.010>
- Fukushima, E., 1999. NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE AS A TOOL TO STUDY FLOW. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 31, 95–123. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.31.1.95>
- Goldschmidt, M.J. V, Link, J.M., Mellema, S., Kuipers, J.A.M., 2003. Digital image analysis measurements of bed expansion and segregation dynamics in dense gas-fluidised beds. *Powder Technol.* 138, 135–159. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2003.09.003>
- Grantham, S.G., Forsberg, F., 2004. Measurement of granular flow in a silo using Digital Speckle Radiography. *Powder Technol.* 146, 56–65. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.powtec.2004.07.009>
- Grudzień, K., Torre Hernandez, G.M., 2013. Detection of tracer particles in tomography images for analysis of gravitational flow in silo. *Image Process. Commun.* <https://doi.org/10.2478/v10248-012-0075-2>
- Hampel, U., Bieberle, A., Hoppe, D., Kronenberg, J., Schleicher, E., Suhnel, T., Zimmermann, F., Zippe, C., 2007. High resolution gamma ray tomography scanner for flow measurement and non-destructive testing applications. *Rev. Sci. Instrum.* 78, 103704.
- Jaworski, A.J., Dyakowski, T., 2001. Application of electrical capacitance tomography for measurement of gas–solids flow characteristics in a pneumatic conveying system. *Meas. Sci. Technol.* 12, 1109.
- Johansen, G.A., Frøystein, T., Hjertaker, B.T., Olsen, Ø., 1996. A dual sensor flow imaging tomographic system. *Meas. Sci. Technol.* 7, 297.
- Kabla, A.J., Senden, T.J., 2009. Dilatancy in Slow Granular Flows. *Phys. Rev. Lett.* 102, 228301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.228301>
- Kaniowski, R., Mieczysław, P., 2013. Measurements of two-phase flow patterns and local void fraction in vertical rectangular minichannel. *Arch. Thermodyn.* <https://doi.org/10.2478/aoter-2013-0007>
- Klinzing, G.E., Rizk, F., Marcus, R., Leung, L.S., 2010. *Pneumatic Conveying of Solids. A theoretical and practical approach (3rd)*. Springer Netherlands.
- Kumar, B.S., Moslemian, D., Duduković, M.P., 1995. A γ -ray tomographic scanner for imaging voidage distribution in two-phase flow systems. *Flow Meas. Instrum.* 6, 61–73. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0955-5986\(95\)93459-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0955-5986(95)93459-8)
- Li, Y., Yang, W., Xie, C., Huang, S., Wu, Z., Tsamakis, D., Lenn, C., 2013. Gas/oil/water flow measurement by electrical capacitance tomography. *Meas. Sci. Technol.* 24, 74001.
- Loser, T., Wajman, R., Mewes, D., 2001. Electrical capacitance tomography: image reconstruction along electrical field lines. *Meas. Sci. Technol.* 12, 1083.
- Lucas, G., Zhao, X., Pradhan, S., 2011. Optimisation of four-sensor probes for measuring bubble velocity components in bubbly air–water and oil–water flows. *Flow Meas. Instrum.* 22, 50–63. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2010.12.004>
- Lueptow, R., Akonur, A., Shinbrot, T., 2000. PIV for granular flows. *Exp. Fluids* 28, 183–186. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s003480050023>



- Michaelides, E., Crowe, C.T., Schwarzkopf, J.D., 2016. *Multiphase Flow Handbook*, Second Edition. CRC Press.
- Michalowski, R.L., 1984. Flow of granular material through a plane hopper. *Powder Technol.* 39, 29–40. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0032-5910\(84\)85017-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0032-5910(84)85017-2)
- Mosorov, V., 2008. Flow Pattern Tracing for Mass Flow Rate Measurement in Pneumatic Conveying Using Twin Plane Electrical Capacitance Tomography. *Part. Part. Syst. Charact.* 25, 259–265.
- Mwambela, A.J., Johansen, G.A., 2001. Multiphase flow component volume fraction measurement: experimental evaluation of entropic thresholding methods using an electrical capacitance tomography system. *Meas. Sci. Technol.* 12, 1092.
- Ostendorf, M., Schwedes, J., 2005. Application of Particle Image Velocimetry for velocity measurements during silo discharge. *Powder Technol.* 158, 69–75. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.04.020>
- Ostrowski, K., Luke, S.P., Bennett, M.A., Williams, R.A., 1999. Real time visualisation and analysis of dense phase powder conveying. *Powder Technol.* 102, 1–13.
- Plaskowski, A., Beck, M., Thorn, R., Dyakowski, T., 1995. *Imaging Industrial Flows: Applications of Electrical Process Tomography*. CRC Press.
- Pouliquen, N.O., Cassar, C., Jop, P., Forterre, M., Y., Nicolas, M., 2006. Flow of dense granular material: towards simple constitutive laws. *J. Stat. Mech. Theory Exp.* 2006, P07020.
- Qiu, C., Primrose, K., 2016. Super-sensing technology: industrial applications and future challenges of electrical tomography. *Phil. Trans. R. Soc. A* 374, 20150328.
- Rechenmacher, A., Finno, R., 2004. Digital Image Correlation to Evaluate Shear Banding in Dilative Sands BT - Digital Image Correlation to Evaluate Shear Banding in Dilative Sands. *Geotech. Test. J.* 27, 13–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1520/GTJ11263J>
- Roels, S., Carmeliet, J., 2006. Analysis of moisture flow in porous materials using microfocus X-ray radiography. *Int. J. Heat Mass Transf.* 49, 4762–4772. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.06.035>
- Ruuskanen, A.R., Seppänen, A., Duncan, S., Somersalo, E., Kaipio, J.P., 2006. Using process tomography as a sensor for optimal control. *Appl. Numer. Math.* 56, 37–54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apnum.2005.02.011>
- Rymarczyk, T., Szumowski, J., Adamkiewicz, P., Duda, K., Sikora, J., 2016. ECT measurement system with optical detection for quality control of flow process. *Przegląd Elektrotechniczny* 92, 157–160.
- Rymarczyk, T., Tchórzewski, P., Adamkiewicz, P., Duda, K., Szumowski, J., Sikora, J., 2017. Practical Implementation of Electrical Tomography in a Distributed System to Examine the Condition of Objects. *IEEE Sens. J.* 17.
- Rząsa, M., 2010. Measurement parameters of gas-liquid two-phase flow by use the process tomography. *Przegląd Elektrotechniczny* 86, 233–238.
- Sankowski, D., Sikora, J., 2012. *Electrical Capacitance Tomography. Theoretical Basis and Applications*. Instytut Elektrotechniki, Warszawa.
- Sanneblad, J., Holmquist, L.E., 2006. Ubiquitous Graphics: Combining Hand-held and Wall-size Displays to Interact with Large Images, in: *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces, AVI '06*. ACM, pp. 373–377. <https://doi.org/10.1145/1133265.1133343>
- Schulze, D., 2008. *Powders and Bulk Solids Behavior, Characterization, Storage and Flow*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin.
- Scott, D., McCann, H. (Ed.), Dyakowski, T., Voutilainen, A., Coveney, J., Hoyle, B., Sick, V., Someya, S., Williams, R., Zhao, D., Kokossis, A., Gray, N., Jaworski, A., Repke, J., Ruuskanen, A., Seppanen, A., Somersalo, E., Takei, M., Wozny, G., Kaipio, J. P., 2005. *Process Imaging For Automatic Control*. Boca Raton: CRC Press.
- Selomulya, C., Jia, X., Williams, R.A., 2005. Direct Prediction of Structure and Permeability of Flocculated Structures and Sediments Using 3D Tomographic Imaging. *Chem. Eng. Res. Des.* 83, 844–852. <https://doi.org/https://doi.org/10.1205/cherd.04330>
- Seville, J.P., Tüzün, U., Clift, R., 2012. *Processing of Particulate Solids*. Springer Science & Business Media, London.
- Shepherd, R.K., Shivdasani, M.N., Nayagam, D.A.X., Williams, C.E., Blamey, P.J., 2013. Visual prostheses for the blind. *Trends Biotechnol.* 31, 562–571. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.07.001>
- Sideman, S., Hijikata, K., 1993. *Imaging in Transport Processes*. Begell House, New York. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/cite.330660724>
- Sikora, J., 2000. Algorytmy numeryczne w tomografii impedancyjnej i wiroprowodowej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Słominski, C., Niedostatkiwicz, M., Tejchman, J., 2007. Application of particle image velocimetry (PIV) for deformation measurement during granular silo flow. *Powder Technol.* 173, 1–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.11.018>
- Smolik, W., 2010. Fast forward problem solver for image reconstruction by nonlinear optimization in electrical capacitance tomography. *Flow Meas. Instrum.* 21, 70–77.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2010.01.001>
- Smolik, W.T., Kryszyn, J., Radzik, B., Stosio, M., Wróblewski, P., Wanta, D., Dańko, L., Olszewski, T., Szabatin, R., 2017. Single-shot high-voltage circuit for electrical capacitance tomography. *Meas. Sci. Technol.* 28, 25902.
- Soleimani, M., Mitchell, C.N., Banasiak, R., Wajman, R., Adler, A., 2009. FOUR-DIMENSIONAL ELECTRICAL CAPACITANCE TOMOGRAPHY IMAGING USING EXPERIMENTAL DATA. *Prog. Electromagn. Res.* 90, 171–186. <https://doi.org/doi:10.2528/PIER09010202>
- Steingart, D.A., Evans, J.W., 2005. Measurements of granular flows in two-dimensional hoppers by particle image velocimetry. Part I: experimental method and results. *Chem. Eng. Sci.* 60, 1043–1051. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.09.066>
- Suzuki, M., Shinmura, T., Iimura, K., Hirota, M., 2008. Study of the Wall Effect on Particle Packing Structure Using X-ray Micro Computed Tomography. *Adv. Powder Technol.* 19, 183–195. <https://doi.org/https://doi.org/10.1163/156855208X293817>
- Tejchman, J., 2013. *Confined Granular Flow in Silos. Experimental and Numerical Investigations.* Springer International Publishing.
- Tejchman, J., 1998. Numerical simulation of filling in silos with a polar hypoplastic constitutive model. *Powder Technol.* 96, 227–239. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(97\)03378-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0032-5910(97)03378-0)
- Tjugum, S.A., Hjertaker, B.T., Johansen, G.A., 2002. Multiphase flow regime identification by multibeam gamma-ray densitometry. *Meas. Sci. Technol.* 13, 1319.
- Tortora, P.R., Ceccio, S.L., O'Hern, T.J., Trujillo, S.M., Torczynski, J.R., 2006. Quantitative measurement of solids distribution in gas–solid riser flows using electrical impedance tomography and gamma densitometry tomography. *Int. J. Multiph. Flow* 32, 972–995. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2006.03.004>
- Vieira, R.E., Kesana, N.R., Torres, C.F., McLaury, B.S., Shirazi, S.A., Schleicher, E., Hampel, U., 2014. Experimental Investigation of Horizontal Gas–Liquid Stratified and Annular Flow Using Wire-Mesh Sensor. *J. Fluids Eng.* 136, 121301–121316.
- Wajman, R., Banasiak, R., 2014. Sensor Review. Tunnel-based method Sensit. matrix Calc. 3D-ECT imaging 34, 273–283. <https://doi.org/https://doi.org/10.1108/SR-06-2013-692>
- Wajman, R., Banasiak, R., Mazurkiewicz, L., Dykowski, T., Sankowski, D., 2006. Spatial imaging with 3D capacitance measurements. *Meas. Sci. Technol.* 17, 2113.
- Wajman, R., Fiderek, P., Fidos, H., Jaworski, T., Nowakowski, J., Sankowski, D., Banasiak, R., 2013. Metrological evaluation of a 3D electrical capacitance tomography measurement system for two-phase flow fraction determination. *Meas. Sci. Technol.* 24, 65302.
- Wang, F., Marshdeh, Q., Fan, L.-S., Warsito, W., 2010. Electrical Capacitance Volume Tomography: Design and Applications. *Sensors (Basel)*. 10, 1890–1917. <https://doi.org/10.3390/s100301890>
- Wang, H., Yang, W., 2011. Scale-up of an electrical capacitance tomography sensor for imaging pharmaceutical fluidized beds and validation by computational fluid dynamics. *Meas. Sci. Technol.* 22, 104015.
- Wang, H.G., Che, H.Q., Ye, J.M., Tu, Q.Y., Wu, Z.P., Yang, W.Q., Ocone, R., 2018. Application of process tomography in gas–solid fluidised beds in different scales and structures. *Meas. Sci. Technol.* 29, 44001.
- Wang, M., Ma, Y., Holliday, N., Dai, Y., Williams, R.A., Lucas, G., 2005. A high-performance EIT system. *IEEE Sens. J.* 5, 289–299. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2005.843904>
- Wang, Q., Polansky, J., Karki, B., Wang, M., Wei, K., Qiu, C., Kenbar, A., Millington, D., 2016. Experimental tomographic methods for analysing flow dynamics of gas-oil-water flows in horizontal pipeline. *J. Hydrodyn. Ser. B* 28, 1018–1021. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(16\)60704-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1001-6058(16)60704-7)
- Warsito, W., Fan, L.-S., 2001. Measurement of real-time flow structures in gas–liquid and gas–liquid–solid flow systems using electrical capacitance tomography (ECT). *Chem. Eng. Sci.* 56, 6455–6462. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(01\)00234-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0009-2509(01)00234-2)
- Warsito, W., Marshdeh, Q., Fan, L.S., 2007. Electrical capacitance volume tomography. *IEEE Sens. J.* 7, 525–535.
- Williams, R.A., 1995. Tomographic imaging for modelling and control of mineral processes. *Chem. Eng. J. Biochem. Eng. J.* 59, 71–85. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0923-0467\(95\)03008-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0923-0467(95)03008-5)
- Williams, R.A., Jia, X., 2003. Tomographic imaging of particulate systems. *Adv. Powder Technol.* 14, 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1163/156855203762469867>
- Williams, R., Beck, M., 1995. *Process Tomography: Principles, Techniques and Applications.* Butterworth-Heinemann.
- Wilmarth, T., Ishii, M., 1994. Two-phase flow regimes in narrow rectangular vertical and horizontal channels. *Int. J. Heat Mass Transf.* 37, 1749–1758. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0017-9310\(94\)90064-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0017-9310(94)90064-7)
- Wójcik, M., Tejchman, J., 2009. Modeling of shear localization during confined granular flow in silos within non-local hypoplasticity. *Powder Technol.* 192, 298–310. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.01.021>
- Xue, Q., Wang, H., Yang, C., Cui, Z., 2012. Dynamical lag correlation exponent based method for gas–solid flow velocity measurement using twin-plane electrical capacitance tomography. *Meas. Sci. Technol.* 23,

85301.

- Yan, Y., 1996. Mass flow measurement of bulk solids in pneumatic pipelines. *Meas. Sci. Technol.* 7, 1687.
- Yang, W., 2010. Design of electrical capacitance tomography sensors. *Meas. Sci. Technol.* 21, 42001.
- Yang, W.Q., 2001. Further developments in an ac-based capacitance tomography system. *Rev. Sci. Instrum.* 72, 3902–3907.
- Yang, W.Q., Peng, L., 2003. Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography. *Meas. Sci. Technol.* 14, R1–R14.
- Yang, Y., Rotter, M., Ooi, J., Wang, Y., 2011. Flow Channel Boundaries in Silos. *Chem. Eng. Technol.* 34, 1295–1302. <https://doi.org/10.1002/ceat.201100049>
- Yao, J., Takei, M., 2017. Application of Process Tomography to Multiphase Flow Measurement in Industrial and Biomedical Fields: A Review. *IEEE Sens. J.* 17, 8196–8205. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2682929>
- York, T., McCann, H., Ozanyan, K.B., 2011. Agile Sensing Systems for Tomography. *IEEE Sens. J.* 11, 3086–3105. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2164905>
- Zhang, W., Wang, C., Yang, W., Wang, C.-H., 2014. Application of electrical capacitance tomography in particulate process measurement – A review. *Adv. Powder Technol.* 25, 174–188. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.appt.2013.12.003>