

**BARTOSZ MATUSIAK, JAKUB BETIUK**

**ANDRZEJ ROMANOWSKI**

Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki  
Politechniki Łódzkiej

**HENRYK FIDOS**

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska  
Politechniki Łódzkiej

## **BEZINWAZYJNE BADANIA ZJAWISK DYNAMICZNYCH ZACHODZĄCYCH W PRZEMYSŁOWYCH PROCESACH PRZEPŁYWÓW DWUFAZOWYCH GAZ-CIECZ**

Recenzent: **doc. dr hab. inż. Roman Szabatin**

Maszynopis dostarczono: 1. 10. 2010

*W wielu procesach przemysłowych występują przepływy dwufazowe gaz-ciecz. Mimo, że badania nad opracowaniem metod pozwalających na badanie zjawisk dynamicznych w tych procesach prowadzone są od wielu lat, do tej pory nie udało się jeszcze rozwiązać wszystkich problemów z nimi związanych. W ostatnim okresie coraz szersze zastosowanie znajdują bezinwazyjne techniki tomograficzne, w szczególności elektryczna tomografia pojemnościowa, która pozwala na uzyskanie rozkładu stałej elektrycznej wewnątrz badanego procesu. W niniejszym artykule przedstawione zostało stanowisko badawcze, w którego skład*

*wchodzi instalacja umożliwiająca monitorowanie przepływów dwufazowych gaz-ciecz z zastosowaniem elektrycznej tomografii pojemnościowej oraz opracowana specjalnie do tego zastosowania konstrukcja czujnika pomiarowego z wewnętrznymi elektrodami.*

## 1. WPROWADZENIE

Dwufazowe procesy przepływowe typu gaz-ciecz są istotne z punktu widzenia wielu gałęzi przemysłu, w tym w szczególności chemicznego, spożywczego, farmaceutycznego, petrochemicznego, czy też np. w oczyszczalniach ścieków. Przykładami instalacji przemysłowych, w których występują takie przepływy są maszyny do transportu hydraulicznego i pneumatycznego cieczy i gazów (pompy), aparaty do rozdzielania układu gaz-ciecz (kolumny rektyfikacyjne), aparaty do wymiany ciepła, a w szczególności reaktory chemiczne i biochemiczne. Bardzo istotną kwestią, z punktu widzenia zastosowań praktycznych, jest metodyka obliczania i doboru parametrów pracy wybranych maszyn i aparatów, określanie zapotrzebowania mocy, zdolności przerobowej lub produkcyjnej w celu maksymalizowania ich wydajności. W skrajnych przypadkach zły dobór tych parametrów może doprowadzić do zaburzenia bezpieczeństwa pracy [1].

Dobór odpowiedniej konfiguracji urządzeń i odpowiedniego trybu ich pracy jest zadaniem złożonym i w dużej mierze opiera się na znajomości zachowania i struktur przepływów. Jest to spowodowane faktem, iż przepływ dwufazowy gaz-ciecz w większości przypadków nie jest laminarny. Występujący ruch płynu wywołany siłami napięcia powierzchniowego i międzyfazowego powoduje niestabilność strugi, co w efekcie może skutkować spadkiem ciśnienia i prędkości przepływu. W związku z tym, istotne jest: wyznaczenie (w układzie gaz-ciecz) ruchu pęcherzyków gazu w cieczy oraz określenie ich parametrów. Natomiast określenie udziału fazy gazowej (np. parametry pęcherzy gazu: średnica, długość) pozwala dokonać odpowiedniego doboru nastaw sterowania i zapewnienia prawidłowego przebiegu procesu [2].

## 2. TECHNIKI POMIARU PRZEPŁYWÓW DWUFAZOWYCH

W ostatnich latach pojawiło się wiele nowych technik pomiaru przepływów wielofazowych. Metody te często wykorzystują pomiar spadku ciśnienia, czy objętości wypartego medium [3]. Do rozwijających się metod pomiarowych

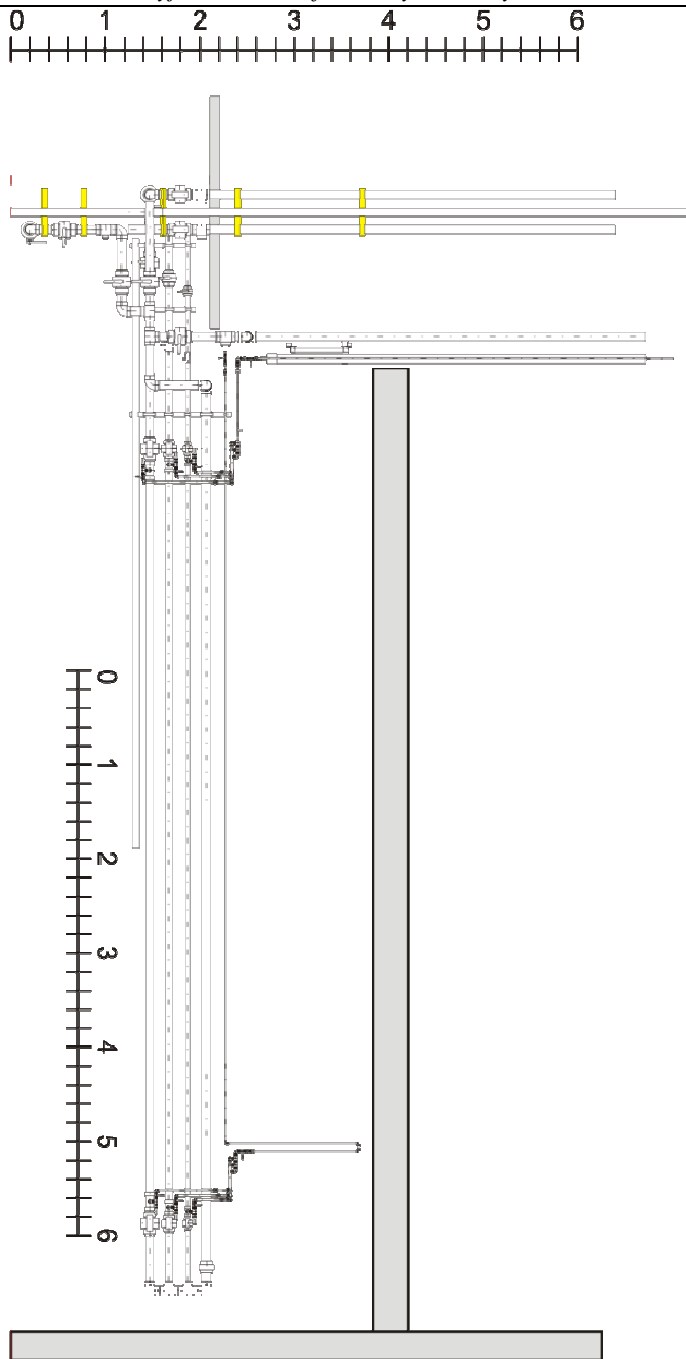
należy zaliczyć także pomiar przepływu masowego wykorzystujący efekt Coriolisa. Metoda ta polega na pozornym zakrzywianiu się toru ruchu ciała poruszającego się w wirującym układzie współrzędnych. Odchylenie toru ruchu ciała w takim układzie zależy od jego prędkości, oraz prędkości wynikającej z ruchu wirowego układu odniesienia. W roku 1977 pojawiły się pierwsze przemysłowe przepływomierze masowe, wprowadzone przez firmę Micro Motion. Dostępne obecnie na rynku przepływomierze masowe Coriolisa, pozwalające na pomiar przepływów o górnej granicy zakresu do 680 t/h. Są one powszechnie wykorzystywane w instalacjach przemysłu petrochemicznego i rafineryjnego (np. w PKN Orlen). Jednak zastosowanie tych przepływomierzy do pomiaru przepływu gazu ziemnego, gdzie zakres pomiarowy (zależnie od ciśnienia gazu) może wynieść około 100 tys. m<sup>3</sup>/h (przy ciśnieniu 101,325 kPa i temperaturze 273,15K), powoduje znaczące uśrednienie wartości pomiarowych. Dodatkowo, wadą tego rozwiązania są problemy z monitoringiem zachodzącego w rurze procesu, a także występowanie niepożądanych zaburzeń procesu przepływowego będących wynikiem wprowadzenia czujników do wnętrza instalacji.

Do badania przepływów dwufazowych gaz-ciecz wykorzystywane były także metody kolorymetryczne [4] oraz metody tomograficzne, przy czym pierwsza z nich nie nadaje się do zastosowania w środowisku przemysłowym. Do tej pory do badań udało się zastosować tomografię promieni Rentgena [5], promieniowania gamma [6] oraz rezonans magnetyczny [1]. Niestety te techniki są bardzo kosztowne, wymagają odpowiednich zabezpieczeń i w większości nie są w stanie zaoferować wystarczającej rozdzielczości czasowej. Na tym tle elektryczna tomografia pojemnościowa (ang. Electrical Capacitance Tomography - ECT), wydaje się bardzo atrakcyjną alternatywą, jako metody do pozyskiwania informacji o przebiegu w/w procesów przemysłowych. Elektryczna Tomografia Pojemnościowa umożliwia obserwację zachodzących zjawisk fizycznych i chemicznych bez potrzeby wnikania w ich wnętrze [7]. Źródłem informacji są pojemności elektryczne pomiędzy elektrodami umieszczonymi na obwodzie czujnika pomiarowego. Na podstawie zebranych pomiarów pojemności elektrycznej - rozwiązując problem odwrotny dla pola elektrycznego - można uzyskać obraz rozkładu przenikalności elektrycznej wewnątrz obszaru czujnika pomiarowego [8]. Bardzo ważną cechą pomiaru w przypadku ECT jest brak konieczności fizycznej interakcji czujnika z badanym medium, dzięki czemu metoda ta jest bezinwazyjna; czyli nie zaburza odbywającego się procesu przemysłowego [9]. Inną zaletą tej techniki pomiarowej jest duża szybkość zbierania danych pomiarowych. Obecnie dostępne na rynku tomografy potrafią zebrać do 1000 wektorów danych na sekundę dla kompletu elektrod czujnika pomiarowego. Pozwala to na zastosowanie ECT w badaniu i monitorowaniu procesów charakteryzujących się wysoką dynamiką zjawisk fizyko-chemicznych. Pojemnościowy tomograficzny system pomiarowy nie wymaga wprowadzania

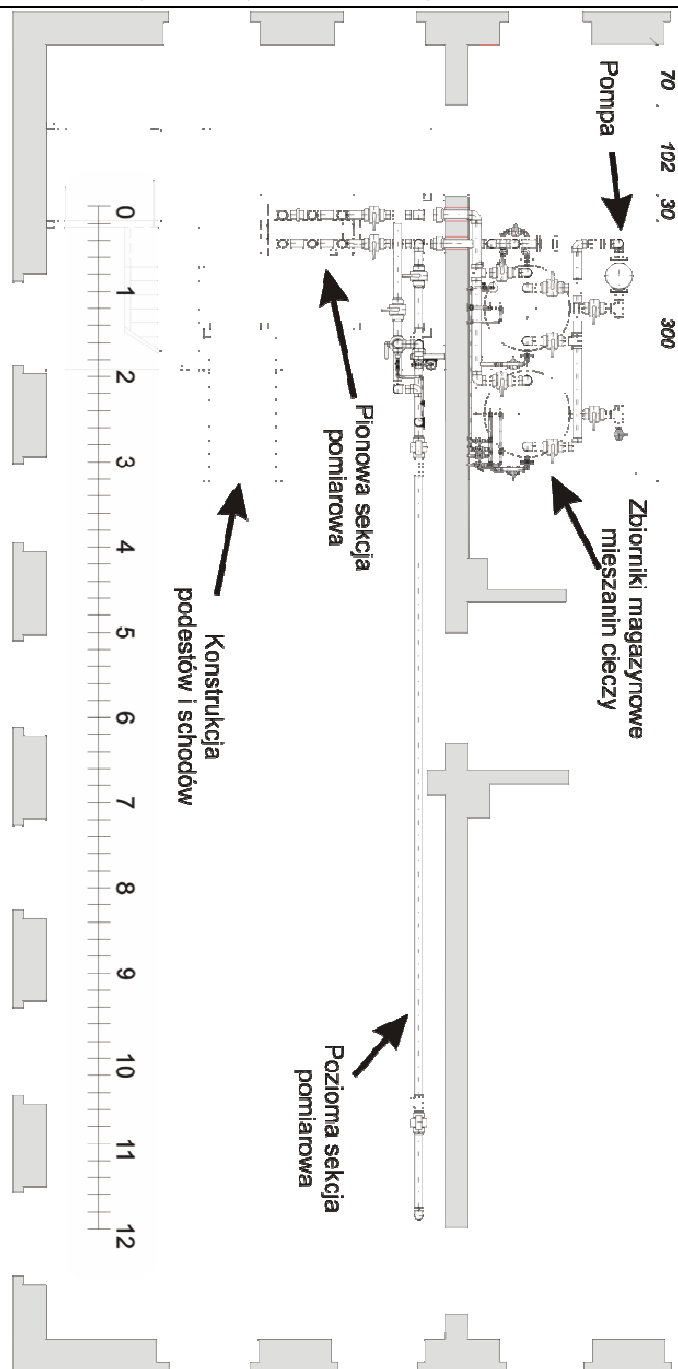
czujników do wnętrza instalacji, w której przebiega monitorowany proces. Pozwala to na bieżąco identyfikować rozkład transportowanego materiału w przekroju poprzecznym rurociągu, zbiornika (np. rozmiar pęcherzy powietrza, itp.). Dzięki zastosowaniu technik korelacyjnych oraz dwupłaszczyznowych tomograficznych czujników pojemnościowych możliwe jest wyznaczenie prędkości przepływu oraz określenie jego charakteru. Informacja ta może być później wykorzystana do obliczania masy przepływającej substancji w jednostce czasu.

### **3. STANOWISKO BADAWCZE**

W laboratorium tomografii procesowej w Katedrze Informatyki Stosowanej zbudowano instalację do badania procesów przemysłowych w oparciu o techniki elektrycznej tomografii pojemnościowej. Warunki pracy tej instalacji, jej gabaryty i moc są porównywalne z występującymi w warunkach przemysłowych.



Rys 1. Rysunek poglądowy instalacji badawczej przepływu dwufazowego: rzut boczny



Rys 2. Rysunek poglądowy instalacji badawczej przepływu dwufazowego: rzut z góry

Na rys. 1 i 2 został przedstawiony schemat instalacji do badań przepływów dwufazowych. Instalacja ta umożliwia przeprowadzanie eksperymentów zarówno w układzie poziomym rurociągów, jak też w układzie pionowym. Każda z poszczególnych części instalacji (pozioma i pionowa), wyposażona jest w rurociągi pomiarowe o trzech różnych średnicach wewnętrznych – odpowiednio 34,0; 53,6 i 81,4 mm, co umożliwia badanie procesów przepływu dwufazowego w różnej skali. Długości odcinków sekcji pomiarowej rurociągów poziomych wynoszą 7,5 m, natomiast długości odcinków sekcji pomiarowej rurociągów pionowych wynoszą 4,0 m. Rurowciągi zbudowane są z rur wykonanych z polichlorku winylu (PCV) i wyposażone w armaturę wykonaną z tego samego materiału. Materiał ten umożliwił w odcinkach pomiarowych zastosowanie elementów przezroczystych, co pozwala obserwować wizualnie, fotografować, bądź rejestrować w technice filmowej struktury przepływu.

Zasilanie rurociągów cieczą zapewnia układ urządzeń, w skład których wchodzi zbiorniki magazynowe oraz wielostopniowa pompa wirowa (rys. 3). W jednym ze zbiorników zainstalowane jest mieszałdo śmigłowe, co umożliwia przygotowywanie cieczy badawczych, którymi mogą być roztwory wodne różnych substancji. Precyzyjne wyznaczenie objętościowego natężenia przepływu tłocznej do rurociągów badawczych cieczy umożliwiają zainstalowane przepływomierze elektromagnetyczne. Przy zastosowaniu pompy typu Grundfoss CRN 45, maksymalna wartość strumienia objętości tłocznej do rurociągu cieczy - o lepkości zbliżonej do lepkości wody - wynosi ok. 50 m<sup>3</sup>/h. Zastosowanie sprężarki śrubowej typu DMD 100 CR pozwala uzyskać strumień objętościowy powietrza o ciśnieniu ok. 7 bar, przy przepływie wynoszący ok. 1000 l/min. Uzyskane wyżej wymienione strumienie objętościowe gazu i cieczy umożliwiają obserwację w instalacji wszystkich rodzajów reżimów przepływu dwufazowego występujących w warunkach przemysłowych - począwszy od przepływu pęcherzykowego, aż po przepływ pierścieniowy.

Gaz dostarczany jest do zainstalowanych na rurociągach dystrybutorów z instalacji ciśnieniowej, której głównym elementem jest sprężarka śrubowa, wyposażona w układ filtracji powietrza. Pomiar strumienia przepływającego gazu umożliwiają dwa precyzyjne przepływomierze masowe o różnych zakresach pomiarowych.

Odcinki pomiarowe rurociągów wyposażone są w szybkie zawory pneumatyczne sterowane elektrycznie, zainstalowane na początku i na końcu każdego z tych odcinków. Zawory te, zamykając się jednocześnie, pozwalają zatrzymać w sekcji testowej rurociągu porcję mieszaniny dwufazowej, co następnie umożliwia dokładny pomiar udziałów poszczególnych jej składników (udziałów faz). Udział objętościowy poszczególnych faz można oszacować mierząc objętość fazy ciekłej w zamkniętej sekcji pomiarowej rurociągu pionowego, bądź określając objętość cieczy, niezbędną do wyparcia fazy gazowej z zamkniętej sekcji pomiarowej rurociągu poziomego. Spadki ciśnienia

podczas przepływu mieszaniny dwufazowej mierzone są za pomocą zainstalowanych manometrów elektronicznych.

a)



b)



Rys 3. Fotografie zbudowanych instalacji badawczych:

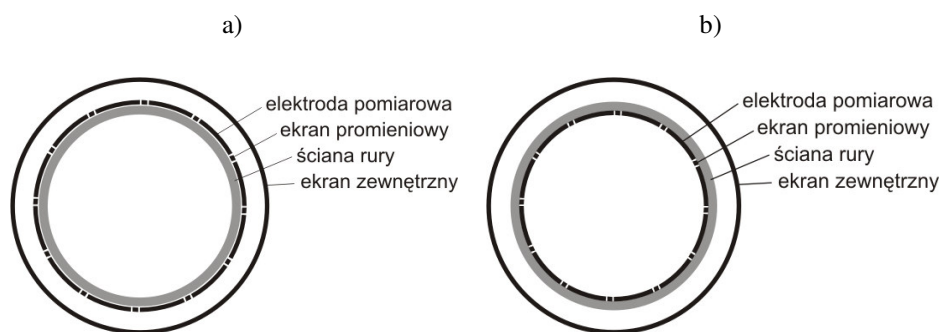
a) instalacja badawcza przepływu dwufazowego, b) zbiorniki magazynowe mieszanin cieczy

#### 4. KONSTRUKCJA CZUJNIKÓW POJEMNOŚCIOWYCH DO BADANIA SUBSTANCJI O WYSOKICH WARTOŚCIACH STAŁEJ ELEKTRYCZNEJ

Elektryczna tomografia pojemnościowa powszechnie stosowana jest w wielu gałęziach przemysłu (np. w przemyśle energetycznym i rafineryjnym, a także transport pneumatyczny materiałów sypkich) do diagnozowania rozkładu gęstości materiałów, których stała względna przenikalności elektrycznej  $\epsilon_r$  przeważnie nie przekracza 5. Jednak w przemyśle chemicznym czy farmaceutycznym często stosowane są ciecze charakteryzujące się znacznie wyższą wartością przenikalności elektrycznej (np. 41 dla alkoholu etylowego i około 80 dla wody demineralizowanej). Skuteczne pomiary tak dużych wartości dla cieczy w porównaniu z bardzo małymi wartościami przenikalności dla powietrza lub ciał stałych (rzędu od 1 do kilku) stanowią poważny problem dla ECT. Dlatego też, zazwyczaj do badania przepływów tego rodzaju cieczy używa

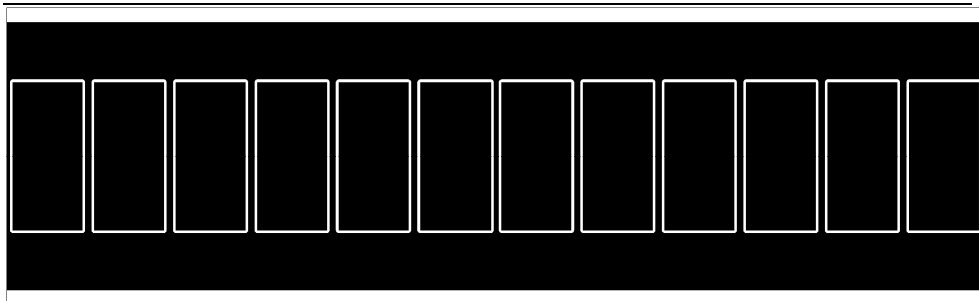
się elektrycznej tomografii impedancyjnej lub rezystancyjnej, które wymagają fizycznego kontaktu z badanym medium. Wymóg kontaktu ogranicza niestety wachlarz ich zastosowań.

Przeprowadzone doświadczenie z wykorzystaniem czujnika zbudowanego z 12 elektrod umieszczonych po zewnętrznej stronie (rys. 4a) rury z PCV ( $\epsilon_r = 5$ ) polegało na zalaniu pustego wnętrza czujnika wodą demineralizowaną ( $\epsilon_r = 80$ ). Z analizy danych pomiarowych wynika, że dla elektrod znajdujących się blisko siebie (sąsiadujących ze sobą oraz niektórych oddalonych od siebie o 2 elektrody) pojemność zmierzona dla czujnika wypełnionego jest mniejsza niż dla czujnika pustego. Zjawisko to występuje wyłącznie w przypadku czujników zewnętrznych, gdy stosunek wartości przenikalności elektrycznej dla materiału, z którego zbudowana jest ścianka oraz dla materiału znajdującego się wewnątrz jest większa od ok. 8 [10]. W takiej sytuacji efekt nieliniowego rozkładu pola elektrycznego pomiędzy bliskimi elektrodami jest dodatkowo wzmocniany. Efekt ten jest tym silniejszy, im grubsza jest ścianka.



Rys 4. Schemat budowy czujnika dla elektrycznego tomografu pojemnościowego:  
a) z elektrodami zewnętrznymi, b) z elektrodami wewnętrznymi

Aby wyeliminować problem nieliniowego rozkładu pola, został zbudowany czujnik składający się z 12 elektrod wewnętrznych (rys. 4b). Elektrody wraz z ekranem wewnętrznym zostały wytrawione na jednowarstwowej elastycznej płytce drukowanej (ang. flexPCB) zgodnie z projektem przedstawionym na rys. 5. W celu minimalizacji efektu utleniania miedzi została ona pokryta cienką warstwą złota. Łączna długość płytki wynosi 328,5 mm. Elektrody mają długość 50 mm i szerokość 23,5 mm. Pasy ekranu pomiędzy elektrodami mają szerokość 2 mm, a odstęp elektrod od ekranu wynosi 1 mm. Pas ekranu powyżej i poniżej elektrod wynosi 19 mm.



Rys 5. Projekt elastycznej płytki drukowanej dla czujnika wewnętrznego

Opracowany czujnik został umieszczony wewnątrz rury z PCV. Podobnie, jak w przypadku czujnika zewnętrznego, zmierzono wartości minimalne przy pustym wnętrzu czujnika pomiarowego oraz maksymalne dla czujnika pomiarowego wypełnionego wodą demineralizowaną. Analiza tych danych potwierdziła fakt, że przy zastosowaniu wewnętrznego czujnika pomiarowego nie występuje problem przerostu odczytów pomiarowych dla wartości minimalnych nad maksymalnymi, który występował przy czujniku zewnętrznym dla elektrod umiejscowionych bliżej siebie. Co więcej, różnice pomiędzy wartościami maksymalnymi i minimalnymi były wystarczająco duże, aby zapewnić większą dokładność pomiarów poprzez poprawę stosunku sygnału do szumu (SNR). Otrzymany efekt doświadczenia potwierdził w związku z tym skuteczność przyjętej strategii pomiarowej, czyli udowodnił możliwość stosowania, ECT jako metody pomiarowo-badawczej w odniesieniu do przepływów typu ciec-z-gaz, nawet dla cieczy o wysokich wartościach stałej elektrycznej.

## 5. PODSUMOWANIE

W niniejszym artykule autorzy przedstawili opracowane stanowisko badawcze składające się z instalacji do badań przepływów dwufazowych gaz-ciecz, umożliwiającej przeprowadzanie eksperymentów zarówno dla przepływów pionowych, jak i poziomych. Przygotowany system wykorzystuje elektryczną tomografię pojemnościową oraz szereg klasycznych czujników pomiarowych do monitorowania przepływów, a w dalszej perspektywie także kamery.

Początkowo wykorzystywany czujnik zewnętrzny z powodu nadmiernego efektu nasycania z powodu nieliniowego zachowania pola elektrycznego dla przyległych elektrod nie nadawał się do badania przepływów, w których występowały cieczy o dużych wartościach stałej elektrycznej. Jednak zaproponowany dedykowany czujnik z elektrodami wewnętrznymi spełnił postawione wymagania. Przy użyciu skonstruowanego czujnika wykonano serię

wstępnych eksperymentów, które potwierdziły skuteczność ECT jako metody badawczej w odniesieniu do przepływów typu ciec-z-gaz, a także wykazały wysoką dokładność proponowanego rozwiązania w porównaniu z innymi metodami opartymi o pomiar spadku ciśnienia i siły Coriolisa.

## PODZIĘKOWANIA

Autorzy dziękują za wsparcie badań poprzez projekt naukowo-badawczy pt. „Uzyskanie doskonałości w badaniach naukowych i przemysłowych zastosowaniach bezinwazyjnych systemów diagnostycznych” nr 167/6, PR UE/2007/7. Projekt finansowany jest przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego RP i wspomaga realizację projektu DENIDIA.

Autorzy artykułu Bartosz Matusiak i Jakub Betiuk są stypendystami projektu „Innowacyjna dydaktyka bez ograniczeń – zintegrowany rozwój Politechniki Łódzkiej – zarządzanie uczelnią, nowoczesna oferta edukacyjna i wzmacnianie zdolności do zatrudniania, także osób niepełnosprawnych” współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

## LITERATURA

- [1] **Nguyen N. L., Van Buren V., Von Garnier A., Hardy E.H., Reimert R.:** Application of magnetic resonance imaging (MRI) for investigation of fluid dynamics in trickle bed reactors and of droplet separation kinetics in packed beds. *Chem. Eng. Sci.* No. 60, 2005, pp. 6289–6297.
- [2] **Dudukovic M. P.:** Opaque multiphase reactors: experimentation, modeling and troubleshooting. *Oil Gas Sci. Tech.* No. 54, 2000, p. 135.
- [3] **Grimley T.A.:** Metering Research Facility Program Coriolis Mass Flow Meter Performance with Natural Gas, Gas Research Institute 01/2002. Report No. GRI-01/0222, GRI Contract No. 8346.
- [4] **Lazzaroni C.L., Keselman H. R., Figoli N. S.:** Colorimetric evaluation of the efficiency of liquid–solid contacting in trickle flow. *Ind. Eng. Chem. Res.* No. 27, 1988, pp. 1132–1135.
- [5] **Schubert M., Hessel G., Zippe C., Lange R., Hampel U.:** Liquid flow texture analysis in trickle bed reactors using high-resolution gamma ray tomography, *Chem. Eng. Journal* No. 140, 2008, pp. 332–340.
- [6] **Van der Merwe W., Nicola W., De Beer F.:** Trickle flow distribution and stability by X-ray radiography, *Chem. Eng. Sci.* No. 132, 2007, pp. 47-59.
- [7] **Beck M. S., Byars M., Dyakowski T., Waterfall R., He R., Wang S.J., Yang W.Q.:** Principles and industrial applications of electrical capacitance tomography, *Measurement and Control* No. 30, 1997, pp. 197-200.

- [8] **Yang W. Q., Peng L.:** Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography, *Meas. Sci. Technol.* No. 14, 2003, pp. 1-14.
- [9] **Matusiak B., da Silva M. J., Hampel U., Romanowski A.:** Measurement of Dynamic Liquid Distributions in a Fixed Bed Using Electrical Capacitance Tomography and Capacitance Wire-Mesh Sensor, *Ind. Eng. Chem. Res.* No. 49, 2010, pp. 2070–2077.
- [10] **Jaworski A., Bolton G.:** The design of an electrical capacitance tomography sensor for use with media of high dielectric permittivity, *Meas. Sci. Technol.* No. 11, 2000, pp. 743–757.

## **NONDESTRUCTIVE INVESTIGATING OF DYNAMIC PHENOMENA IN GAS LIQUID TWO-PHASE FLOWS IN INDUSTRY PROCESSES**

### **Summary**

Gas-liquid two-phase flows can be found in many industry processes. For many years researchers are developing methods for monitoring dynamic phenomena in these processes but still not all the problems were solved. Last years, tomographic techniques were used widely for these purposes. The most common is Electrical Capacitance Tomography, which enables the possibility to monitor the distribution of relative electrical constant inside the investigating vessel. In this paper, authors present an experimental setup consisting of process installation feasible to monitor gas-liquid two-phase flows using Electrical Capacitance Tomography and a specially developed sensor with internal electrodes.

Politechnika Łódzka  
Katedra Informatyki Stosowanej