

Bartosz Matusiak\*, Krzysztof Grudzień\*, Andrzej Romanowski\*

## Wykorzystanie ECT do badania rozkładu cieczy w reaktorach trójfazowych

### 1. Wprowadzenie

Elektryczna tomografia pojemnościowa (ECT – *Electrical Capacitance Tomography*) jest techniką pozwalającą na obserwację zachodzących zjawisk fizycznych i chemicznych bez potrzeby wnikania w ich wnętrze [1]. Jako źródło informacji wykorzystywane są wartości pojemności elektrycznej pomiędzy elektrodami. Elektrody te są umieszczone na obwodzie czujnika pomiarowego, wewnątrz którego przebiega proces. Bardzo ważną cechą pomiaru w przypadku ECT jest brak konieczności fizycznej interakcji czujnika z badanym medium, dzięki czemu metoda ta nie zaburza odbywającego się procesu przemysłowego. Na drodze rozwiązania problemu odwrotnego dla pola elektrycznego na podstawie zebranych pomiarów pojemności można uzyskać obraz rozkładu przenikalności elektrycznej wewnątrz obszaru czujnika pomiarowego [17]. Dzięki bardzo dużej szybkości zbierania danych pomiarowych, dochodzącej obecnie nawet do kilkuset wektorów danych pomiarowych na sekundę [2, 18], elektryczna tomografia pojemnościowa znajduje zastosowanie w badaniu i monitorowaniu procesów charakteryzujących się wysoką dynamiką zjawisk fizykochemicznych.

Dotychczas, elektryczna tomografia pojemnościowa znalazła zastosowania w wielu gałęziach przemysłu, w których występują substancje różniące się przenikalnością elektryczną. Najczęściej wykorzystuje się ją w przemyśle energetycznym i rafineryjnym [13] oraz do badania transportu pneumatycznego materiałów sypkich [3]. W przypadku tych procesów względna przenikalność elektryczna  $\epsilon_r$  badanych substancji przeważnie nie przekracza wartości 8, podczas gdy w przemyśle chemicznym oraz farmaceutycznym stosowane są ciecze o dużych wartościach  $\epsilon_r$ , jak np. 41 dla alkoholu etylowego i około 79 dla wody demineralizowanej. Skuteczne pomiary w przypadku występowania substancji o tak dużych wartościach względnej przenikalności elektrycznej stanowią poważny problem dla

---

\* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka

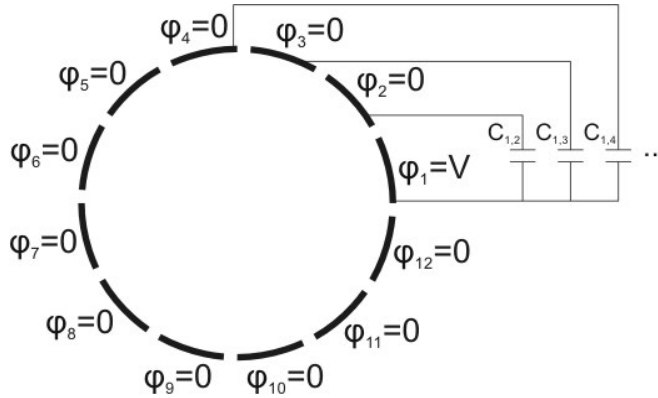
elektrycznej tomografii pojemnościowej. Dlatego też zazwyczaj, do badania tego rodzaju przepływów używa się elektrycznej tomografii impedancyjnej lub rezystancyjnej. Jednak te metody wymagają fizycznego kontaktu z badanym medium co znacznie ogranicza wachlarz ich zastosowań. Jednocześnie należy pamiętać, że dla substancji nieprzewodzących zastosowanie metod opartych na pomiarze konduktywności jest niemożliwe. Dlatego też elektryczna tomografia pojemnościowa jest dobrą alternatywą i jak zostało pokazane w [3], można z powodzeniem użyć tej techniki do monitorowania substancji o dużych wartościach przenikalności elektrycznej pod warunkiem zastosowania czujnika pomiarowego z wewnętrznymi elektrodami.

Przykładem procesu, często występującego w przemyśle, w którym wykorzystuje się przepływ cieczy jest reaktor trójfazowy (TBR – *Trickle Bed Reactor*). Występuje w nim przepływ cieczy oraz gazu wzdłuż kolumny wypełnionej ciałem stałym w postaci granulatu. Granulat stanowi w tym przypadku katalizator dla procesu zachodzącego pomiędzy gazem a cieczą [8]. Reaktory trójfazowe znajdują bardzo szerokie zastosowanie w przemyśle chemicznym, farmaceutycznym, petrochemicznym, biochemicznym, a także w oczyszczalniach ścieków. Ponieważ reaktory te są wykorzystywane do przetwarzania rozmaitych materiałów w bardzo dużych ilościach, badania nad optymalną ich eksploatacją są konieczne zarówno ze względów ekonomicznych, jak i wydajnościowych. Sterowanie zachodzącym w reaktorze procesem powinno być powiązane ze stałym monitorowaniem przepływu cieczy przez złożę, niezależnie od wybranego reżimu przepływu. W przeciwnym wypadku proces może przebiegać zbyt wolno lub katalizator ulegnie zbyt szybkiemu zużyciu, a w skrajnych przypadkach, w wyniku procesów egzotermicznych, może dojść do zachwiania bezpieczeństwa pracy reaktora.

Zjawiska fizyczne, które występują podczas przepływów w reaktorach trójfazowych są zjawiskami bardzo złożonymi i trudnymi do analizy. Mimo że badania są prowadzone od wielu lat, do tej pory nie udało się jeszcze rozwiązać wszystkich problemów pojawiających się podczas tego rodzaju procesów. Wciąż szukane są nowe metody, umożliwiające całkowite zrozumienie zachowania się substancji w trakcie przepływu. Dotychczas do badania reaktorów trójfazowych wykorzystywane były czujniki lokalne [3], które nie są w stanie dostarczyć wszystkich potrzebnych informacji o procesie, a także metody kolorymetryczne [3], które nie nadają się do zastosowania w trakcie procesów przemysłowych oraz metody tomograficzne. Ze względu na złożoność procesów w reaktorach trójfazowych te ostatnie wydają się jednak najodpowiedniejsze. Do tej pory do badań udało się zastosować tomografię promieni Rentgena [13], promieniowania gamma [13] oraz rezonans magnetyczny [8]. 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 wydaje się bardzo atrakcyjną metodą do badania reaktorów trójfazowych.

## 2. Pomiar i obraz w elektrycznej tomografii pojemnościowej

Jak zostało wspomniane we wstępie w elektrycznej tomografii pojemnościowej wielkością mierzoną są pojemności pomiędzy kolejnymi parami elektrod umieszczonymi równomiernie na obwodzie czujnika pomiarowego. Pomiary mogą być dokonywane pomiędzy wszystkimi parami lub tylko pomiędzy niezależnymi parami elektrod. W trakcie pomiaru potencjał  $V$  zostaje przyłożony do jednej z elektrod i mierzone są pojemności pomiędzy tą elektrodą a pozostałymi, co przedstawiono na rysunku 1.



**Rys. 1.** Schemat pomiaru w ECT dla czujnika pomiarowego z dwunastoma elektrodami:  
 $\varphi$  – potencjał elektryczny,  $V$  – wartość potencjału przyłożonego do elektrody pomiarowej,  
 $C_{i,j}$  – pojemność pomiędzy elektrodami  $i$  oraz  $j$

Zmierzona pojemność jest zależna od przenikalności elektrycznej  $\epsilon_r$  zgodnie ze wzorem:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r k_g \quad (1)$$

gdzie:

- $C$  – pojemność elektryczna,
- $\epsilon_0$  – przenikalność elektryczna próżni ( $8,85 \text{ pF m}^{-1}$ ),
- $\epsilon_r$  – względna przenikalność elektryczna,
- $k_g$  – współczynnik geometrii problemu.

Na podstawie prawa Gaussa oraz równania Laplace'a można otrzymać równanie określające zależność pojemności od rozkładu przenikalności elektrycznej wewnątrz czujnika pomiarowego:

$$C_{ij} = -\frac{1}{\varphi_j - \varphi_i} \oint_{\Gamma} \epsilon_0 \epsilon_r(x, y) \nabla \varphi(x, y) d\Gamma \quad (2)$$

gdzie:

- $C_{ij}$  – pojemność elektryczna pomiędzy elektrodami  $i$  oraz  $j$ ,
- $\varphi_i$  – potencjał na elektrodzie  $i$ ,
- $\varphi_j$  – potencjał na elektrodzie  $j$ ,
- $\epsilon_0$  – przenikalność elektryczna próżni ( $8,85 \text{ pF m}^{-1}$ ),
- $\epsilon_r(x, y)$  – rozkład względnej przenikalności elektrycznej,
- $\varphi(x, y)$  – rozkład potencjału,
- $x, y$  – współrzędne w układzie kartezjańskim.

Dla każdej serii pomiarów, rozwiązując problem odwrotny, można uzyskać rozkład przenikalności elektrycznej w obszarze wnętrza czujnika, który najczęściej jest przedstawiany w postaci obrazu tomograficznego.

Rozwiązanie problemu odwrotnego w tomografii pojemnościowej jest utrudnione głównie ze względu na brak prostej zależności pomiędzy pomiarami pojemności a rozkładem przenikalności elektrycznej. Zależność ta jest zależnością nieliniową. Należy również zauważyć, że w przypadku obrazu o rozdzielczości  $32 \times 32$  piksele (standardowy rozmiar obrazu tomograficznego stosowany w tomografii pojemnościowej), poszukiwane są wartości przenikalności elektrycznej, przyporządkowane 1024 pikselom. W niniejszej pracy wykorzystano system z czujnikiem składającym się z 12 elektrod. Dzięki temu możliwe było otrzymanie jedynie 66 niezależnych odczytów pomiarów pojemności. Oznacza to, że liczba niewiadomych jest znacznie większa od liczby danych. Tak postawiony problem odwrotny ma podkreślony charakter, co stanowi duże utrudnienie przy jego rozwiązywaniu.

W niniejszej pracy założeniem było wykorzystanie tomografii pojemnościowej do monitorowania procesu zachodzącego w reaktorze w czasie rzeczywistym. W zasadzie jedynym algorytmem który umożliwia otrzymanie zrekonstruowanych obrazów w trybie *on-line* jest liniowa projekcja wsteczna (LBP – *Linear Back Projection*) [17]. Metoda ta jest szybka i prosta w implementacji. Opiera się na liniowym przybliżeniu zależności pomiędzy pomiarami, a rozkładem przenikalności, co może być zapisane w postaci:

$$\mathbf{C} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{G} \quad (3)$$

gdzie:

- $\mathbf{C}$  – wektor zmierzonych pojemności,
- $\mathbf{S}$  – macierz czułości,
- $\mathbf{G}$  – wektor reprezentujący rozkład przenikalności elektrycznej.

Przybliżone rozwiązanie z wykorzystaniem liniowej projekcji wstecznej można uzyskać korzystając ze wzoru:

$$\hat{\mathbf{G}} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{S}^{-1} \cdot \mathbf{C} \quad (4)$$

gdzie:

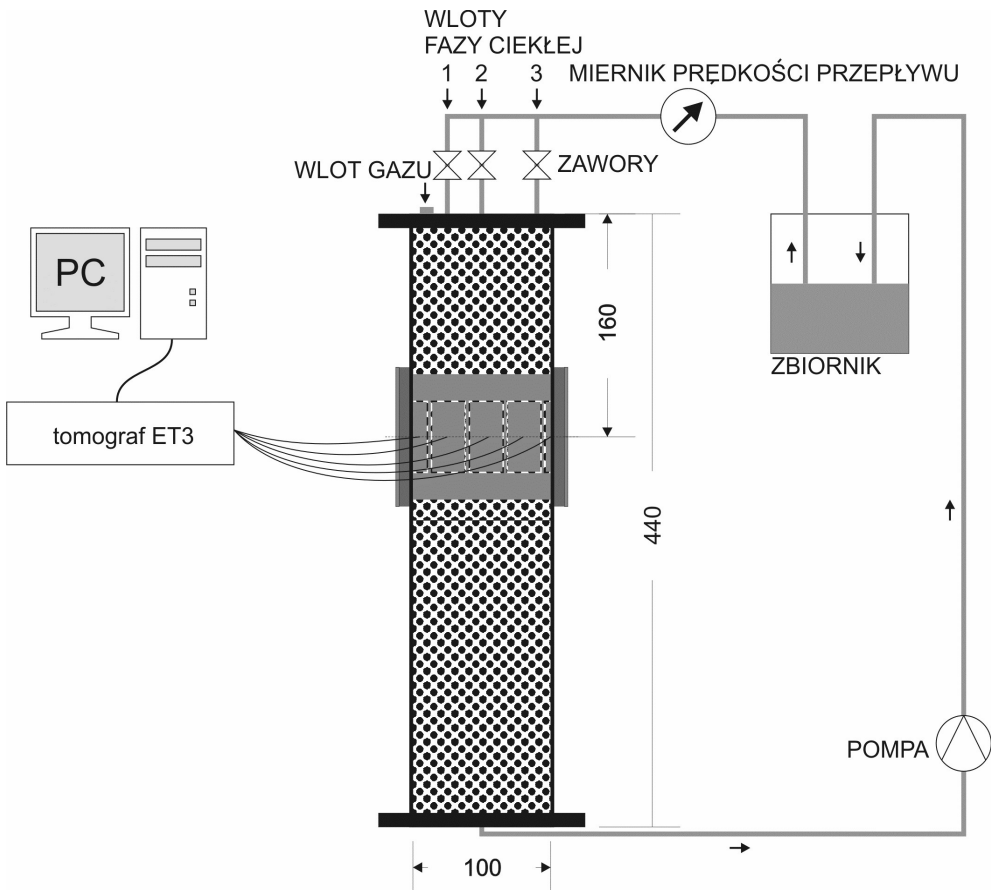
- $\mathbf{C}$  – wektor zmierzonych pojemności ,
- $\mathbf{S}^{-1}$  – pseudoodwrotność macierzy czułości  $\mathbf{S}$ , która nie jest kwadratowa,
- $\mathbf{G}$  – przybliżony wektor reprezentujący rozkład przenikalności elektrycznej,
- $\mathbf{H}$  – filtr korygujący projekcję wsteczną.

Bardzo ważnym dla jakości zrekonstruowanego obrazu jest sposób, w jaki uzyskuje się mapę czułości. W tej pracy autorzy wykorzystali mapę czułości obliczona na podstawie analizy równania Poissona dla pola elektrycznego [15].

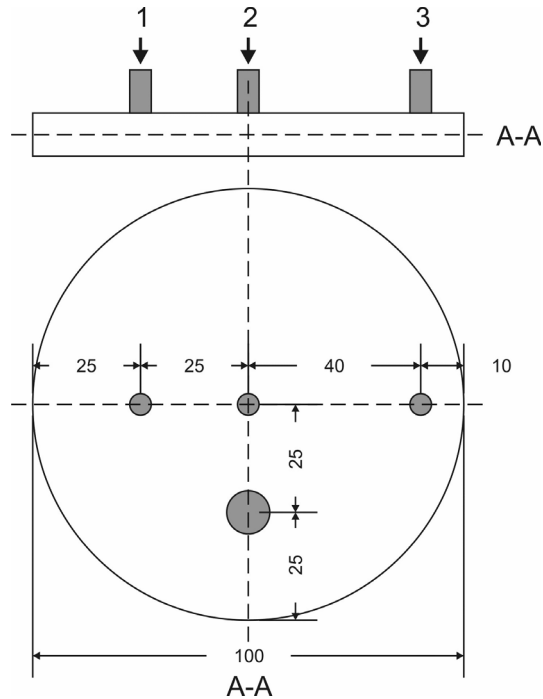
### 3. Stanowisko badawcze

#### 3.1. Doświadczalny reaktor trójfazowy

Wszystkie doświadczenia były przeprowadzone w doświadczalnym modelu reaktora trójfazowego przedstawionym na rysunku 2. Kolumna reaktora została wykonana z rury PVC o średnicy 100 mm i wysokości 440 mm. Na szczycie kolumny zamontowano płytę z trzema otworami służącymi do wpuszczania cieczy (rys. 3).



Rys. 2. Stanowisko badawcze z doświadczalnym reaktorem trójfazowym



Rys. 3. Górna płyta z otworami do wprowadzenia fazy ciekłej

Wnętrze reaktora zostało wypełnione w sposób przypadkowy komercyjnymi porowatymi kulkami katalizatora  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , którego charakterystyka została przedstawiona w tabeli 1. Literatura [5] podaje, że względna przenikalność elektryczna czystego  $\text{Al}_2\text{O}_3$  wynosi 9,33, jednak z naszych pomiarów wynika, że względna przenikalność elektryczna użytych cząstek wynosiła ok. 2,1–2,6. Jest to spowodowane porowatością kulek i wolną przestrzenią pomiędzy nimi.

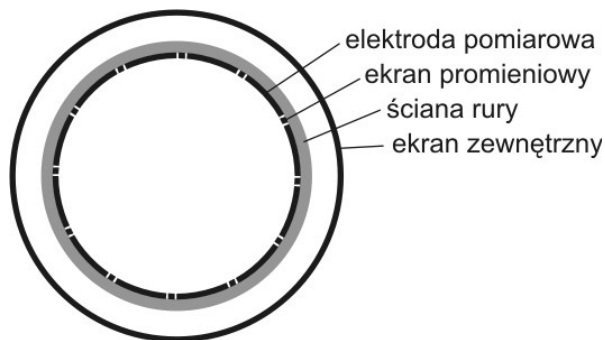
**Tabela 1**  
Parametry użytych kulek katalizatora

Własność	Wartość
Podłoże katalizatora	$\text{Al}_2\text{O}_3$
Kształt	kulki
Średnia średnica	4,0 mm
Całkowita powierzchnia	$90 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$
Objętość porów	$0,65 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$
Gęstość objętościowa	$750 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Względna przenikalność elektryczna czystego podłoża	9,33
Względna przenikalność elektryczna użytych kulek	2,1–2,6

Reaktor był użytkowany w temperaturze pokojowej i przy ciśnieniu otoczenia. Jako fazy ciekłej użyto izopropanolu ( $C_3H_8O$ ), którego względna przenikalność elektryczna wynosi 20,18 [5]. Był on wpuszczany przez jeden z trzech otworów znajdujących się na górze reaktora przy objętościowym natężeniu przepływu wynoszącym  $40 L \cdot h^{-1}$  oraz  $60 L \cdot h^{-1}$ .

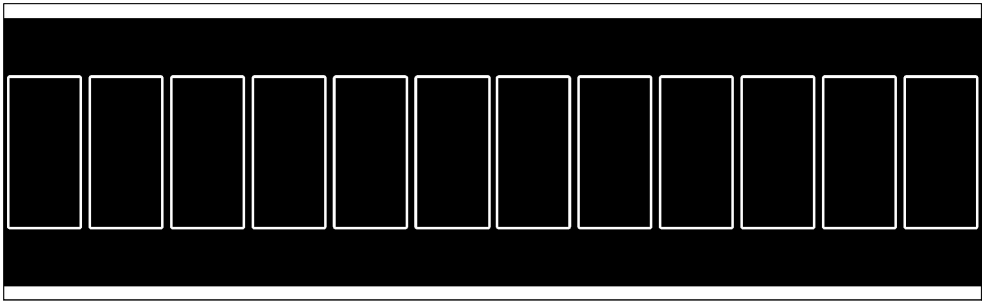
### 3.2. Wykorzystany system pomiarowy ECT

W przeprowadzonych eksperymentach wykorzystano tomograf ET3 skonstruowany w Instytucie Radioelektroniki Politechniki Warszawskiej [9]. Zasada pomiaru pojemności w tym tomografie bazuje na tzw. metodzie CD (*charge-discharge*), a jego konstrukcja daje możliwość niezależnego dostrojenia wzmocnień dla wszystkich par elektrod, co pozwala na uzyskanie korzystniejszego stosunku sygnału do szumu, a w efekcie bardziej adekwatnego wyniku pomiaru. Tomograf był sterowany z komputera klasy PC, który dokonywał także rekonstrukcji obrazów i archiwizacji danych pomiarowych. Z wykorzystaniem tomografu ET3 udało się uzyskać 60 zestawów pomiarowych na sekundę, z czego każdy zawierał 66 niezależnych pomiarów pojemności międzyelektrodowych. Do dyskretyzacji obszaru czujnika wykorzystano siatkę złożoną z 1536 elementów trójkątnych. Użyty czujnik pomiarowy składał się z 12 elektrod wewnętrznych. Jego budowa została przedstawiona na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat budowy wewnętrznego czujnika pomiarowego

Elektrody wraz z ekranem wewnętrznym zostały wytrawione na jednowarstwowej elastycznej płycie drukowanej (*flexiblePCB*) zgodnie z projektem przedstawionym na rysunku 5. W celu minimalizacji efektu utleniania miedzi została ona pokryta cienką warstwą złota. Łączna długość płytki wynosi 328,5 mm, a elektrody mają długość 50,0 mm i szerokość 23,5 mm. Pasy ekranu pomiędzy elektrodami mają szerokość 2,0 mm, a odstęp elektrod od ekranu wynosi 1,0 mm. Pas ekranu powyżej i poniżej elektrod wynosi 19,0 mm.



Rys. 5. Projekt elastycznej płytki drukowanej dla czujnika wewnętrzny

Na obwodzie kolumny reaktora zostało wykonanych 12 otworów o średnicy 8,0 mm w równych odstępach od siebie. Następnie we wnętrzu rury została wklejona przygotowana elastyczna płytka drukowana w taki sposób aby jej środek znajdował się w odległości 160 mm od góry reaktora (rys. 2). Płytkę została umieszczona stroną zadrukowaną w kierunku ścian, aby przez wykonane wcześniej otwory możliwe było przyłączenie przewodów zarówno do elektrod jak i do ekranu. Klej został umieszczony na całym obwodzie płytki drukowanej, aby uniemożliwić wyciek cieczy pomiędzy elektrodą a ścianką zbiornika. Po przyłutowaniu przewodów do płytki drukowanej, otwory w rurze zostały zalane klejem temperaturowym z pistoletu. Ekran zewnętrzny został wykonany z arkusza miedzi o grubości 0,1 mm i umieszczony po zewnętrznej stronie kolumny reaktora w odległości 10,0 mm od ścianki.

### 3.3. Kalibracja i przetwarzanie danych

W ECT dla każdej pary elektrod zakres wartości pojemności jakie mogą zostać zmierzone jest inny. Dlatego też do obliczeń stosuje się znormalizowane wartości pojemności. W niniejszym artykule normalizacja została wykonana zgodnie z modelem równoległym [3]:

$$C_{ij}^{norm} = \frac{C_{ij} - C_{ij}^{\min}}{C_{ij}^{\max} - C_{ij}^{\min}} \quad (5)$$

gdzie:

$C_{ij}^{norm}$  – znormalizowana wartość pojemności pomiędzy elektrodami  $i, j$ ,

$C_{ij}$  – pojemność pomiędzy elektrodami  $i, j$ ,

$C_{ij}^{\min}$  – minimalna pojemność pomiędzy elektrodami  $i, j$ ,

$C_{ij}^{\max}$  – maksymalna pojemność pomiędzy elektrodami  $i, j$ .



Po wypełnieniu kolumny reaktora suchymi kulkami katalizatora zostały zebrane pomiary pojemności dla wartości minimalnych. Następnie reaktor został całkowicie zalany. Po 15 minutach zostały zebrane pomiary pojemności dla wartości maksymalnych, po czym Izoopropanol został spuszczone z reaktora. Ten schemat postępowania nawiązuje jednocześnie do procedury *Levec pre-wetting* [13], której celem jest przygotowanie reaktora do pracy.

Jednym z ważnych parametrów charakteryzujących przebieg procesu w reaktorach trójfazowych jest wartość wypełnienia cieczą określaną jako *liquid holdup*. W nawiązaniu do [11], w przypadku stosowania ECT, wartości te nie powinny być liczone na podstawie pomiarów, ponieważ zależność pomiędzy pomiarami pojemności a frakcją cieczy jest nieliniowa. Dlatego też w tej pracy wartości wypełnienia cieczą zostały obliczone zgodnie ze wzorem (6), na podstawie obrazów tomograficznych przedstawiających rozkład przenikalności elektrycznej w obszarze czujnika pomiarowego.

$$H = \frac{\sum_{i=1}^N A_i G_i}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad (6)$$

gdzie:

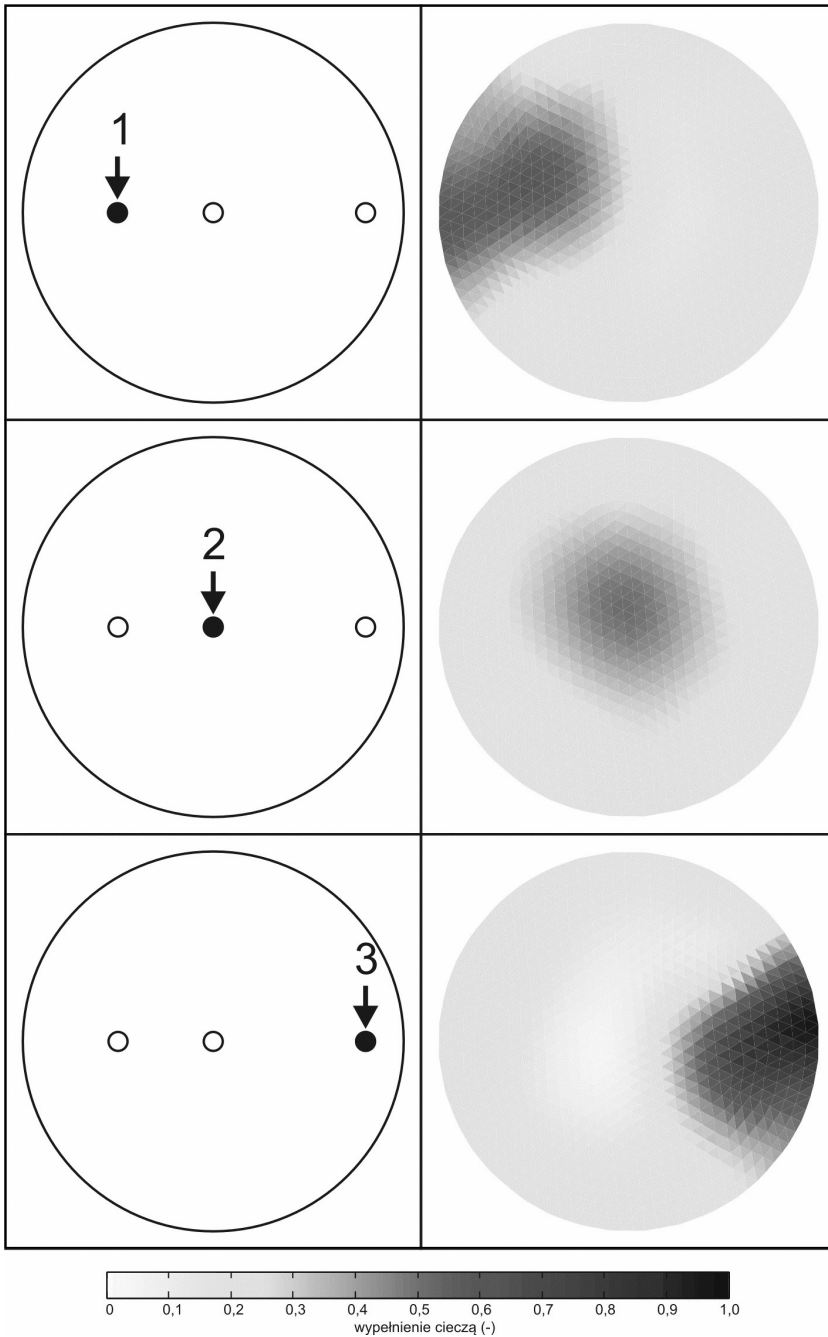
- $H$  – wartość wypełnienia cieczą (*liquid holdup*),
- $A_i$  – obszar  $i$ -tego fragmentu obrazu tomograficznego,
- $G_i$  – znormalizowana wartość w  $i$ -tym fragmencie obrazu tomograficznego,
- $N$  – liczba fragmentów na jaką został podzielony obraz tomograficzny.

## 4. Doświadczenia i wyniki

W ramach pracy zostały przeprowadzone badania zarówno w warunkach, gdy przepływ cieczy przy wlocie do reaktora był stały, jak i przy wymuszonych zmianach tego przepływu. Doświadczenia przeprowadzone przy stałym przepływie cieczy zostały określone w niniejszym artykule jako warunki statyczne, a dla zmiennego przepływu jako warunki dynamiczne.

### 4.1. Warunki statyczne

Dla stałego przepływu cieczy przez każdy z trzech otworów na szczycie kolumny doświadczalnego reaktora zostały zarejestrowane po dwie serie pomiarów trwające po 20 s. Dla każdego otworu pierwsza seria była zarejestrowana przy objętościowym natężeniu przepływu wynoszącym  $40 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  oraz druga przy objętościowym natężeniu przepływu wynoszącym  $60 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ . Następnie każda seria pomiarów została uśredniona i na ich podstawie dokonano rekonstrukcji obrazów tomograficznych przedstawiających rozkład przenikalności elektrycznej wewnątrz reaktora, w miejscu zamontowania czujnika pomiarowego.



**Rys. 6.** Rozkłady cieczy wewnątrz obszaru czujnika pomiarowego dla różnych otworów wlotowych przy objętościowym natężeniu przepływu wynoszącym  $40 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$

Ponieważ pomiary zostały znormalizowane z uwzględnieniem złoża znajdującego się w reaktorze to obrazy te odpowiadają rozkładowi cieczy. Na rysunku 6 przedstawiono rozkłady cieczy przy objętościowym natężeniu przepływu wynoszącym  $40 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ . Pomimo niewielkiej rozdzielczości obrazów można zauważyć, że największa koncentracja cieczy występuje w miejscach znajdujących się bezpośrednio pod otworami wlotowymi, co oczywiście jest zgodne z naturą procesu.

Na podstawie zrekonstruowanych obrazów zostały także obliczone wartości wypełnienia cieczą (*liquid holdup*) ze wzoru (6). Obliczone wartości zostały ujęte w tabeli 2. Należy zwrócić uwagę, że wyniki te są do siebie zbliżone dla takiego samego natężenia przepływu cieczy, lecz różnych otworów wlotowych. Biorąc pod uwagę, że natężenie przepływu można utożsamiać z ilością cieczy, jaka powinna być wewnątrz reaktora, jest to prawidłowa zależność, ponieważ wraz ze zwiększeniem natężenia przepływu rośnie również wypełnienie cieczą obszaru wewnątrz czujnika. Co warto także zauważyć to fakt, że wypełnienie cieczą jest niezależne od otworu, którym wpuszczana jest ciecz.

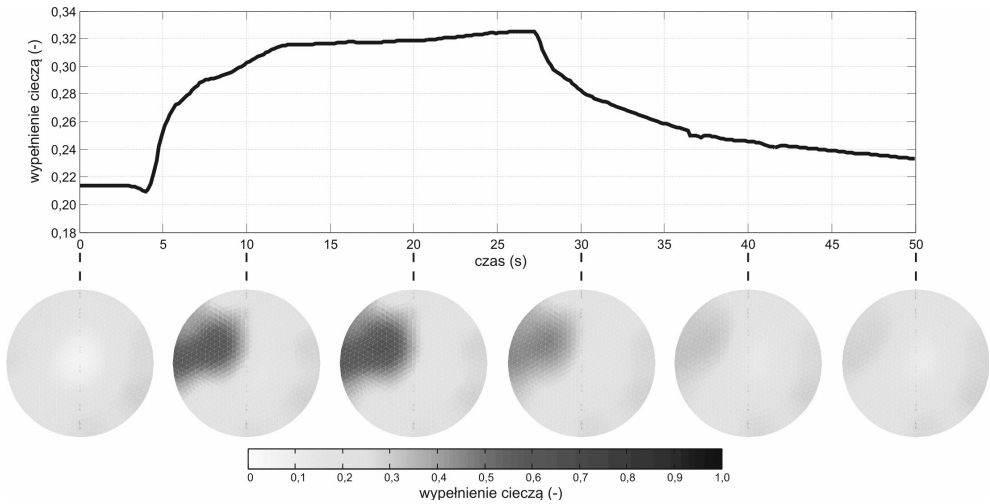
**Tabela 2**  
Porównanie procentowego wypełnienia cieczą dla różnych przepływów

Bez przepływu	Otwór 1 $40 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$	Otwór 1 $60 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$	Otwór 2 $40 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$	Otwór 2 $60 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$	Otwór 3 $40 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$	Otwór 3 $60 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$
19,0%	26,8%	32,1%	26,6%	33,6%	26,1%	30,5%

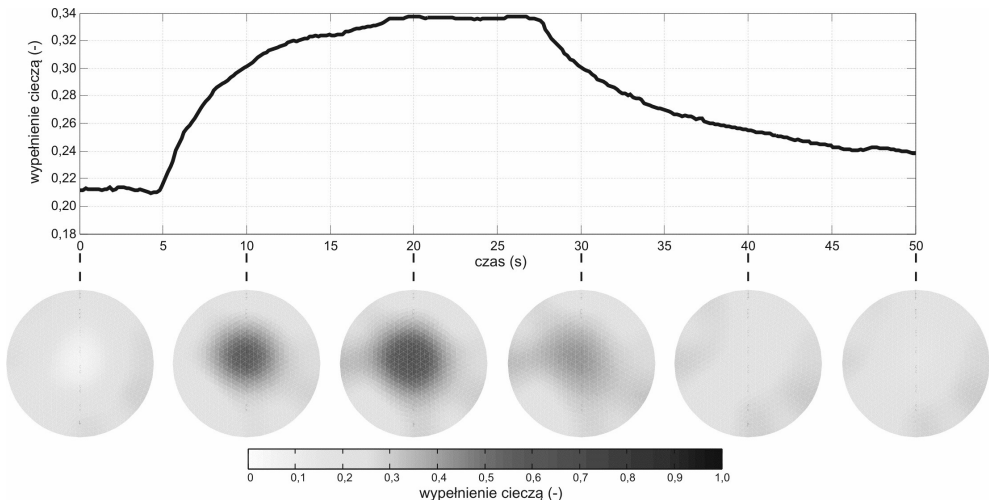
## 4.2. Warunki dynamiczne

Analogicznie jak w przypadku doświadczeń dla warunków stacjonarnych zostały przeprowadzone próby osobno dla każdego z otworów wlotowych w warunkach wymuszanych zmian natężenia przepływu wpuszczanej cieczy. Za każdym razem została zarejestrowana seria pomiarów trwająca 50 s. Po ok. 5 s od rozpoczęcia rejestracji przez jeden z otworów wlotowych u góry doświadczalnego reaktora był wpuszczany izopropanol z objętościowym natężeniem przepływu wynoszącym  $60 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  przez czas 20 s, a następnie przepływ był zatrzymywany. Na rysunkach 7–8 przedstawiono odpowiednio dla każdego z otworów wlotowych wykres zmian wypełnienia cieczą zbiornika w czasie. Dodatkowo umieszczono na rysunkach zrekonstruowane obrazy tomograficzne przedstawiające rozkład cieczy w wybranych chwilach czasu. Przebiegi zmian wypełnienia cieczą przedstawione na poszczególnych wykresach pokazują, że dane zarejestrowane z wykorzystaniem tomografii pojemnościowej są czasowo zbieżne ze zmianami przepływu, jakie miały miejsce w trakcie doświadczenia. Na każdym z wykresów widać znaczy wzrost wypełnienia cieczą w chwili ok. 5 s i spadek po ok. 23 s. od chwili wzrostu. Ze względu na pojemność przewodów doprowadzających ciecz i umiejscowienie czujnika w pewnej odległości od szczytu

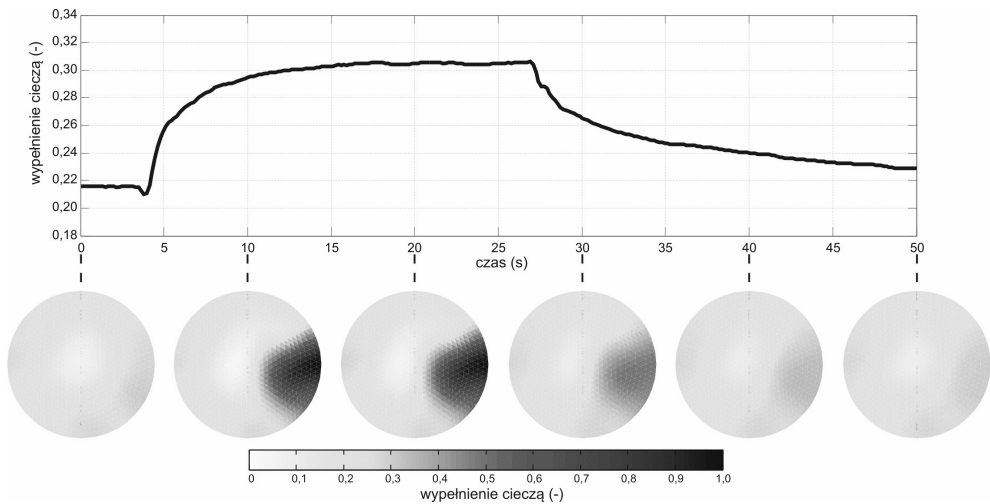
doświadczalnego reaktora (rys. 2) czas ten może być trochę dłuższy od czasu otwarcia zaworu kontrolującego przepływ wpuszczanej cieczy. Potwierdza to prawidłowe działanie wykorzystanego systemu tomografii pojemnościowej.



**Rys. 7.** Rozkłady cieczy i przebieg wypełnienia cieczą dla przepływu zmiennego przez otwór 1 przy objętościowym natężeniu przepływu wynoszącym  $60 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$



**Rys. 8.** Rozkłady cieczy i przebieg wypełnienia cieczą dla przepływu zmiennego przez otwór 2 przy objętościowym natężeniu przepływu wynoszącym  $60 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$



**Rys. 9.** Rozkłady cieczy i przebieg wypełnienia cieczą dla przepływu zmiennego przez otwór 3 przy objętościowym natężeniu przepływu wynoszącym  $60 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$

## 5. Wnioski

W niniejszym artykule autorzy przedstawili przygotowany system wykorzystujący elektryczną tomografię pojemnościową do monitorowania rozkładu cieczy w reaktorach trójfazowych. Ze względu na duże wartości względnej przenikalności elektrycznej substancji, które mogą się pojawić wewnątrz reaktora trójfazowego zastosowano czujnik pomiarowy z wewnętrznymi elektrodami. Do rekonstrukcji obrazów użyto prostej, ale szybkiej metody liniowej projekcji wstecznej, co było uwarunkowane koniecznością śledzenia zmian w trybie on-line, w trakcie przeprowadzania doświadczeń z dynamicznie zmiennymi przepływami.

Przeprowadzone eksperymenty potwierdziły słuszność wyboru ECT jako metody badawczej dla reaktorów trójfazowych. Jest to metoda bardzo szybka i nieinwazyjna dzięki czemu nie wpływa na przebieg procesu. Zrekonstruowane obrazy przedstawiające rozkład cieczy wewnątrz obszaru czujnika pomiarowego pomimo niewielkiej rozdzielczości jaką daje zastosowana liniowa projekcja wsteczna korespondują z otworami, przez które była wprowadzana faza ciekła. Na podstawie tych obrazów możliwe jest także obliczenie wartości wypełnienia cieczą. Przeprowadzone doświadczenia ze zmiennymi w czasie parametrami procesu pokazały także, że z wykorzystaniem tej techniki tomograficznej możliwe jest także śledzenie zmian dynamicznych wypełnienia zbiornika cieczą.

Autorzy niniejszego artykułu uważają, że możliwe jest dalsze polepszenie rozdzielczości obrazów tomograficznych, a co za tym idzie dokładniejsze obliczenie wartości wypełnienia cieczą. W tym celu należy rozważyć użycie bardziej zaawansowanych metod re-

konstrukcji obrazów lub ich modyfikacji uwzględniających charakter procesów w reaktorach trójfazowych. Zdaniem autorów, powinny zostać także przeprowadzone próby wykorzystania procesorów graficznych (GPU – *Graphics Processing Unit*) do rekonstrukcji obrazów tomograficznych, co umożliwi zastosowanie bardziej złożonych algorytmów przy zachowaniu możliwości obserwacji procesów w czasie rzeczywistym.

## Podziękowania

Prace Bartosza Matusiaka są współfinansowane ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego i Budżetu Państwa w ramach Działania 2,6 Zintegrowanego Programu Operacyjnego Rozwoju Regionalnego, w związku z realizacją Projektu p.n. „Stypendia wspierające innowacyjne badania naukowe doktorantów”. Prace badawcze prowadzone przez Andrzeja Romanowskiego są wspierane w ramach programu „Innowacyjna dydaktyka bez ograniczeń – zintegrowany rozwój Politechniki Łódzkiej” współfinansowanego przez Fundusz Socjalny Unii Europejskiej.

Autorzy niniejszego artykułu dziękują Centrum Badawczemu Dresden-Rossendorf, w Niemczech, za współpracę w dziedzinie badań nad wykorzystaniem tomografii pojemnościowej do monitorowania procesów zachodzących w reaktorach trójfazowych.

## Literatura

- [1] 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, nr 30, 1997, 197–200.
- [2] Byars M., *Developments in Electrical Capacitance Tomography*. 2nd World Congress on Industrial Process Tomography, Hannover, 2001.
- [3] Jaworski A., Bolton G., *The design of an electrical capacitance tomography sensor for use with media of high dielectric permittivity*. Meas. Sci. Technol., nr 11, 2000, 743–757.
- [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., nr 27, 1988, 1132–1135.
- [5] Lide D.R., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 86th edition, CRC Press, Boca Raton, 2005.
- [6] Marcandelli C., Lamine A.S., Bernard J.R., Wild G., *Liquid distribution in trickle bed reactor*. Oil Gas Sci. Technol., nr 55, 2000, 407–415.
- [7] Matusiak B., Romanowski A., Grudzień K., *Projektowanie czujników dla elektrycznego tomografu pojemnościowego do badania przepływów cieczy*. Prace Instytutu Elektrotechniki, nr 239, 2008, 73–88.
- [8] 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., nr 60, 2005, 6289–6297.
- [9] Olszewski T., Brzeski P., Mirkowski J., Płaskowski A., Smolik W., Szabatin R., *Capacitance tomograph – design and preliminary results*. 2nd Symposium on Process Tomography, Wrocław, 2002, 159–168.
- [10] Propp R., Colella P., Crutchfield W., Day M., *A Numerical Model for Trickle Bed Reactors*. Journal of Computational Physics, nr 165, 2000, 311–333.

- [11] Reinecke N., Mewes D., *Investigation of the two-phase flow in trickle-bed reactors using capacitance tomography*. Chem. Eng. Sci., nr 52, 1997, 2111–2127.
- [12] Romanowski A., Grudzien K., Williams R.A., *Analysis and Interpretation of Hopper Flow Behaviour Using Electrical Capacitance Tomography*. Particle & Particle Systems Characterization, nr 23, 2006, 297–305.
- [13] 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, nr 140, 2008, 332–340.
- [14] Van der Merwe W., Nicola W., De Beer F., *Trickle flow distribution and stability by X-ray radiography*. Chem. Eng. Sci., nr 132, 200, 47–59.
- [15] Wajman R., Mazurkiewicz Ł., Banasiak R., *The sensitivity map in the image reconstruction process for Electrical Capacitance Tomography*. 3rd International Symposium on Process Tomography in Poland, Lodz, 2004, 165–168.
- [16] Xie C.G., Huang S.M., Hoyle B.S., Thorn R., Lenn C., Snowden D., Beck M.S., *Electrical capacitance tomography for flow imaging – system model for development of image reconstruction algorithms and design of primary sensors*. IEE Proc., nr 139, 1992, 89–98.
- [17] Yang W.Q., Peng L., *Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography*. Meas. Sci. Technol., nr 14, 2003, R1–R13.