

Mariusz R. Rząsa*, Anna Błaszak-Gawlik*, Radosław Wajman**

Pojemnościowe metody wyznaczania udziału objętościowego w badaniu przepływów dwufazowych gaz-ciecz

1. Wprowadzenie

Podczas badania przepływów dwufazowych gazu-cieczy dużym utrudnieniem przy określeniu udziału objętościowego jest dynamika zjawisk zachodzących podczas przepływu dwufazowego. Tego rodzaju przepływy charakteryzują się różnorodną strukturą przepływu od przepływów rozwarstwionych po przepływy korkowe i pęcherzykowe [1]. Dynamika zmian stanu i koncentracji dwóch faz w badanym przekroju przysparza wiele trudności pomiarowych podczas określania podstawowych parametrów przepływu.

Związki ilościowe pomiędzy fazą ciągłą, fazą rozproszoną i mieszaniną są wyrażone w postaci udziałów objętościowych lub masowych:

$$\alpha = \frac{V_g}{V} = \frac{A_g}{A} \quad (1)$$

gdzie:

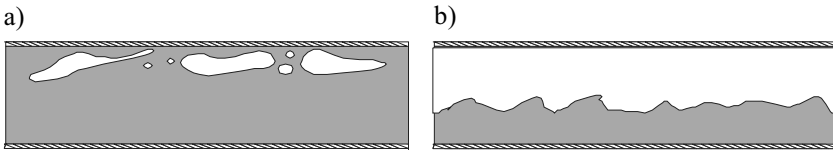
- A_g – powierzchnia międzyfazowa,
- A – powierzchnia przekroju poprzecznego rurociągu,
- V_g – objętość gazu [m³],
- V – objętość mieszaniny [m³].

W celu określenia udziału objętościowego, konieczna jest znajomość powierzchni międzyfazowej lub objętość gazu. Ciągłe zmiany tych parametrów podczas przepływu znacznie utrudniają poprawne zmierzenie tych wielkości dotychczas stosowanymi metodami pomiarowymi. Pewnym uproszczeniem jest wprowadzenie pojęcia koncentracji masowej lub objętościowej, co nieco upraszcza pomiar tych wielkości, jednak wymaga rozseparowania faz i przeprowadzenia oddzielnie pomiaru objętości gazu i cieczy, co nie zawsze jest możliwe do zrealizowania w instalacjach przemysłowych.

* Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej, Politechnika Opolska

** Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka

Dodatkową trudność przy wyznaczaniu powierzchni międzyfazowej stanowi charakter przepływu oraz zmiany struktury przepływu w zależności od strumieni fazy gazowej i ciekłej. Przykładowo dla przepływów poziomych (rys. 1) przedstawiono dwie struktury, których odmienny charakter może nastęrczać wielu problemów pomiarowych.

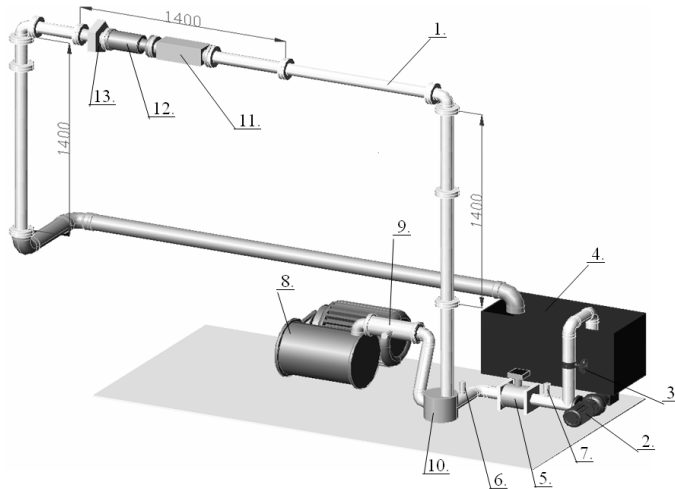


Rys. 1. Wybrane struktury (a, b) przepływu gaz-ciecz w przepływie poziomym

W pracy przedstawiono system, który umożliwi poprawne wyznaczenie udziału objętościowego dla tak różnych struktur przepływu.

2. Stanowisko badawcze

Ze względu na złożony charakter zjawisk zachodzących podczas przepływu gaz-ciecz, opracowano stanowisko badawcze, które umożliwia wytworzenie typowych struktur przepływu w górze, w dół oraz w poziomie.



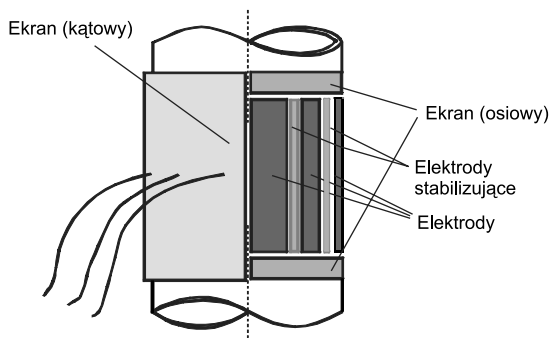
Rys. 2. Budowa stanowiska badawczego. 1 – układ rur, 2 – pompa wirowa, 3 – zawór otwierający bypass, 4 – zbiornik z wodą, 5 – przepływomierz elektromagnetyczny, 6 – czujnik pomiaru temperatury, 7 – czujnik pomiaru ciśnienia, 8 – sprężarka ze zbiornikiem wyrównawczym, 9 – termoelement do pomiaru strumienia gazu, 10 – komora mieszająca, 11 – wziernik o przekroju kwadratowym, 12 – czujnik pojemnościowy ze skreconymi elektrodami, 13 – tomograf pojemnościowy

Na rysunku 2 przedstawiono budowę stanowiska badawczego [2]. Na stanowisku zamontowano dwa niezależne systemy pomiarowe. Pierwszym czujnikiem do wyznaczania udziału objętościowego jest tomograf pojemnościowy 13. Drugim rozwiązaniem czujnika do wyznaczania udziału objętościowego jest czujnik pojemnościowy ze skręconymi elektrodami 12. Obydwa czujniki zainstalowano na tym samym odcinku rurociągu, co umożliwi porównanie otrzymanych wyników.

3. Budowa tomografu pojemnościowego

W pracy przedstawiono rozwiązanie tomografu pojemnościowego, którego zasada działania polega na pomiarze zmian pojemności pomiędzy kombinacją połączeń elektrod w czujniku pomiarowym (rys. 3). Metoda pojemnościowa jest często stosowana ze względu na prostotę konstrukcji i dużą uniwersalność. Dobre rezultaty uzyskuje się w zastosowaniu powyższej metody do obiektów o rozmiarach większych od jednej piątej średnicy czujnika. W przypadku pomiaru małych obiektów występuje problem odpowiedniego wywzorcowania czujnika pomiarowego oraz uzyskania odpowiedniej czułości. Wpływ na czułość ma zarówno budowa czujnika pomiarowego jak i budowa przetwornika pomiarowego.

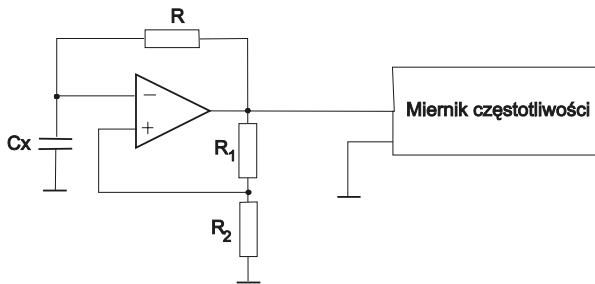
Budowę czujnika przedstawiono na rysunku 3. Czujnik składa się z 16 elektrod przy średnicy wewnętrznej rurociągu 76 mm. Zastosowanie dużej liczby elektrod wpływa na zwiększenie rozdzielczości czujnika, jednakże powoduje, że zwiększa się kąt, pod którym zwrócone są do siebie sąsiadujące elektrody, co zmniejsza czułość czujnika. Ponadto zwiększenie liczby elektrod powoduje zmniejszenie ich powierzchni, co powoduje przesunięcie zakresu pomiarowego w kierunku małych pojemności. Czynniki te spowodowały, że konieczne było zwiększenie długości elektrod (przyjęto elektrody równe 1,5 średnicy rurociągu). Przy tak długich elektrodach zrezygnowano z elektrod wyrównujących pole, jak to jest często stosowane w typowych czujnikach pojemnościowych, gdyż nierównomierność pola na końcach elektrod nie wpływa znacząco na wyniki pomiaru.



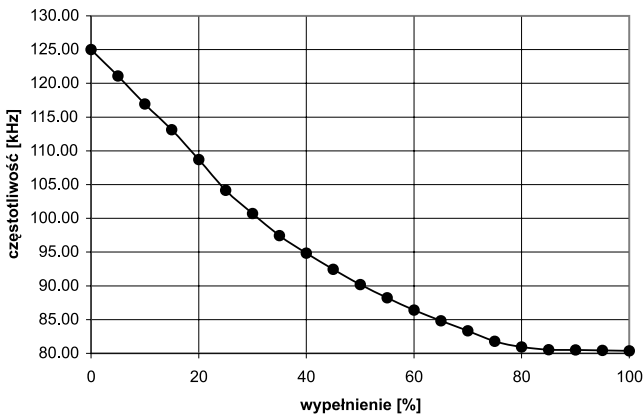
Rys. 3. Budowa czujnika pomiarowego

Jako przetwornik pomiarowy zastosowano układ zamiany pojemności na częstotliwość. Układy takie są bardzo wygodne, gdyż częstotliwość można mierzyć z dużą rozdzielczością, co jest bardzo istotne podczas pomiaru małych wartości zmian pojemności [2]. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 4 [3, 4]. Pojemność międzyelektrodowa jest elementem filtra RC wyznaczającego częstotliwość drgań generatora. Wypadkowa przenikalność dielektryka jest funkcją przenikalności poszczególnych faz.

Pomiar częstotliwości dla przebiegu prostokątnego posiada dodatkową zaletę, że nie wymaga stosowania układów detekcji zera, a ponadto umożliwia bezpośrednie połączenie przetwornika do procesora, co znacznie upraszcza układ pomiarowy.



Rys. 4. Budowa przetwornika pomiarowego

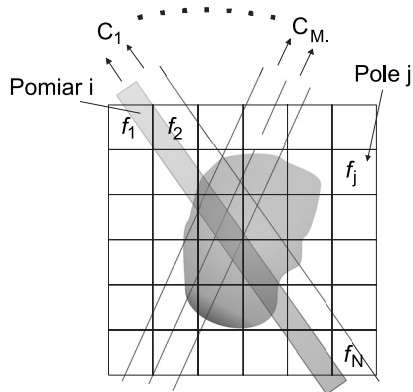


Rys. 5. Zmiana częstotliwości na wyjściu przetwornika pomiarowego w zależności od wypełnienia

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki badań testowych, gdzie dla różnego stopnia wypełnienia rurociągu wodą zmierzono częstotliwość na wyjściu z przetwornika. Jak wynika to z otrzymanej charakterystyki, największe zmiany częstotliwości w stosunku do zmian wypełnienia czujnika wodą (największa czułość) uzyskuje się dla małych wypełnień rurociągu. Układ traci czułość dla wypełnienia bliskiego 100%. Jest to typowe dla pomiaru pojemności, gdy obiekt badany o niskim współczynniku przenikalności dielektrycznej ma

małe wymiary. Nasuwa to wniosek, że dla przepływów pęcherzykowych, gdy ilość gazu w rurociągu jest stosunkowo mała należy zastosować inne metody pomiarowe.

Rekonstrukcja obrazu z tomografu polega na wyznaczeniu wartości f_i w poszczególnych polach obrazu (rys. 6). Wartości pól można wyznaczyć za pomocą odpowiednich algorytmów rekonstrukcji obrazu.



Rys. 6. Idea rekonstrukcji obrazu

Jako podstawowy algorytm do rekonstrukcji obrazu zastosowano LBP. Metoda ta jest mało dokładna, ale za to jest prosta i szybka. W aplikacjach inżynierskich wartości f_i w poszczególnych polach obrazu wylicza się na podstawie wzoru:

$$\forall_{j=1..N} \quad f_j = \frac{\sum_{i=1}^M w_{ij} \cdot C_i}{\sum_{i=1}^M w_{ij}} \quad (2)$$

gdzie:

M – liczba pomiarów dla jednego obrazu zdeterminowana ilością elektrod,

w_{ij} – element macierzy czułości wyznaczonej na podstawie rozwiązania równania Poissona,

C_i – znormalizowana wartość pojemności mierzonej:

$$C_i = \frac{C_m - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \cdot 100\% \quad (3)$$

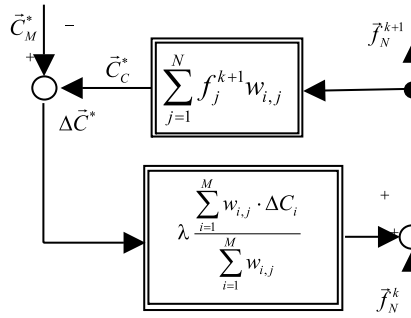
gdzie:

C_m – pojemność mierzona,

C_{\max} – pojemność dla czujnika całkowicie wypełnionego wodą,

C_{\min} – pojemność dla czujnika całkowicie wypełnionego powietrzem.

W celu poprawy jakości obrazu uzyskiwanego z tomografu pojemnościowego dodatkowo zastosowano algorytm IBP (*Iterative Back Projection*) [6]. Wymaga on jednak większego nakładu obliczeniowego, co spowalnia proces pomiarowy. Celowe jest zastosowanie tego algorytmu tam gdzie wymagana jest większa dokładność pomiaru lub jakość obrazu. Metoda polega na wyliczeniu wartości funkcji poprzez kolejne przybliżenie metodą iteracyjną.



Rys. 7. Idea algorytmu iteracyjnego

Rysunek 7 przedstawia ideę iteracyjnego algorytmu rekonstrukcji obrazów. Z pomiaru otrzymuje się wektor wielkości mierzonych \vec{C}_M^* , który podlega normalizacji zgodnie z wzorem (3). Zakładany jest początkowy rozkład przenikalności elektrycznej i rozpoczyna się proces rekonstrukcji. Dla początkowego rozkładu przenikalności \vec{f}_N^* obliczany jest wektor pojemności \vec{C}_C^* na podstawie wzoru:

$$\forall_{i \in \langle 1, M \rangle} C_i = \sum_{j=1}^N f_j w_{i,j} \quad (4)$$

gdzie N – liczba pikseli w obrazie zrekonstruowanym.

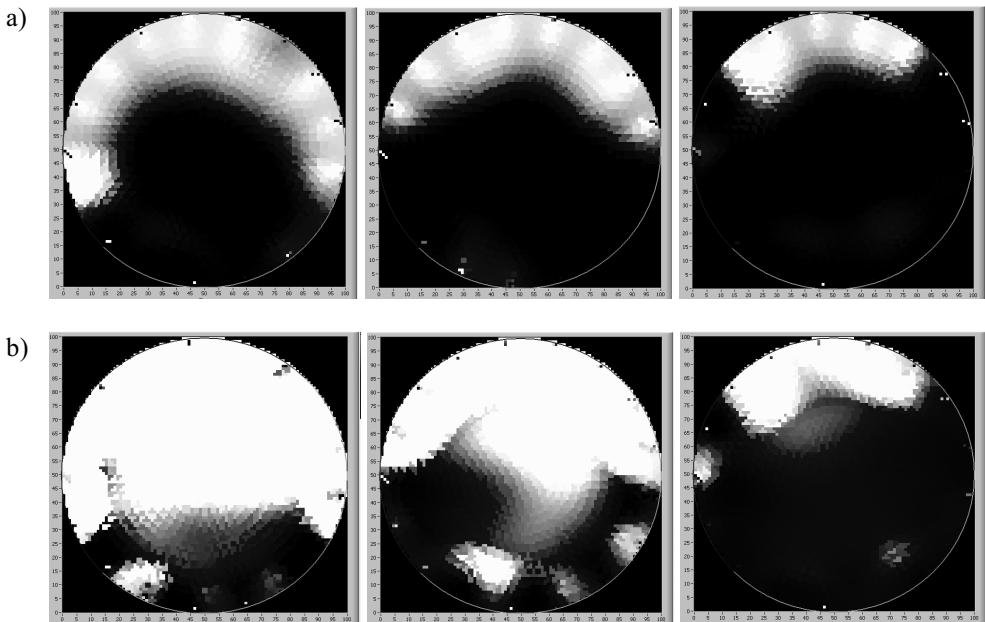
Następnie wylicza się błąd wektora pojemności:

$$\Delta C_i = C_{M(i)} - C_{C(i)} \quad (5)$$

na podstawie którego dokonuje się wyliczenia kolejnej iteracji wektora funkcji rekonstrukcji:

$$\forall_{j=1..N} f_j^{k+1} = f_j^k + \lambda \frac{\sum_{i=1}^M w_{ij} \cdot \Delta C_i}{\sum_{i=1}^M w_{ij}} \quad (6)$$

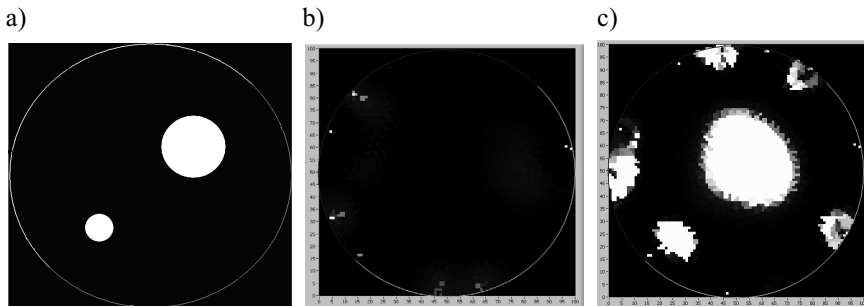
gdzie λ – współczynnik relaksacji.



Rys. 8. Wyniki rekonstrukcji dla przepływu rozwarstwowanego woda-powietrze dla siatki rekonstrukcji 100×100 : a) metoda LBP; b) metoda IBP dla $\lambda = 0,3$

Na rysunku 8 przedstawiono wyniki rekonstrukcji obrazu metodą LBP i IBP dla kilku wybranych przepływów. Dla metody LBP w przypadku wypełnienia rurociągu w połowie wodą (rys. 8a) jest wyraźnie dostrzegalna jest mała czułość systemu pomiarowego w środku pola, co powoduje że, metodą LBP nie można poprawnie odtworzyć rozkład faz w tym miejscu. Wadę tę można poprawić, stosując iteracyjne metody rekonstrukcji obrazu. Rezultaty poprawy wyników rekonstrukcji dla trzech wybranych przepływów o różnym stopniu wypełnienia rurociągu przedstawiono na rysunku 8b. Zastosowano w tym celu algorytm *Iterative Back Projection*, który znacznie poprawia jakość odtworzenia rozkładu koncentracji w środkowej części rurociągu [5] (rys. 8b). W prezentowanych wynikach rekonstrukcji zastosowano 70 iteracji, które pozwoliły na uzyskanie zadowalających rezultatów. Analizując otrzymane obrazy, należy uwzględnić, że pomiar jest prowadzony dla cieczy płynącej. Poruszająca się ciecz jest nośnikiem ładunków elektrycznych, co znacznie utrudnia prowadzenie pomiaru.

Znacznie większą trudność stanowi określenie małych wartości udziału objętościowego przykładowo dla takich obiektów jak pęcherze. W celu oszacowania błędu w przekroju pomiarowym umieszczono dwie rury o różnych średnicach wypełnione powietrzem (rys. 9a). Rury miały odpowiednio średnice równe 10 mm i 35 mm. Wyniki rekonstrukcji przedstawiono na rysunku 9.



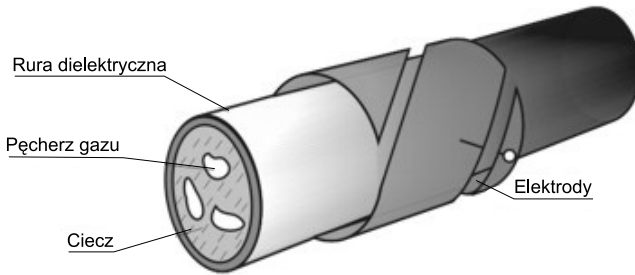
Rys. 9. Porównanie wyników pomiaru: a) fantom; b) obraz z tomografu pojemnościowego dla metody rekonstrukcji LBP; c) obraz z tomografu pojemnościowego dla metody rekonstrukcji IBP

Przykład ten pokazuje pewne trudności w prawidłowym określeniu wartości koncentracji gazu. W związku z tym proponuje się zastosowanie czujnika pojemnościowego składającego się z dwóch elektrod, którego czułość jest stosunkowo duża nawet dla małych wartości koncentracji.

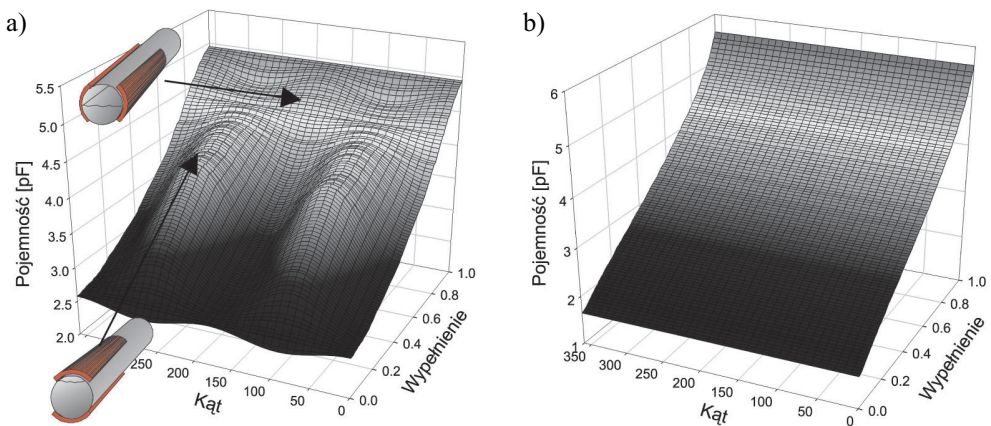
4. Budowa pojemnościowego czujnika do wyznaczania udziału objętościowego

Czujniki pojemnościowe mogą być użyte do oszacowania współczynnika koncentracji w przepływie dwufazowym, jeżeli dwie fazy mają odmienne relatywne stałe dielektryczne. Zależność pomiędzy stężeniem komponentów a stałą dielektryczną mieszaniny gaz/płyn, a co za tym idzie – pojemnością czujnika, nie jest prosta i zależy w dużym stopniu od rozkładu komponentów w mieszaninie. Jak do tej pory, czujniki pojemnościowe były stosowane tylko do homogenicznych (jednorodnych) mieszanin. Budowę typowego czujnika przedstawiono na rysunku 10 [8]. Składa się on z dwóch elektrod umieszczonych wokół rury, stanowiącej cargę pomiarową. Główną wadą czujników pojemnościowych z prostą powierzchnią elektrod jest to, że ich pojemność silnie zależy od rodzaju przepływu i rozkładu. Dlatego dokładne wyniki uzyskiwane są jedynie, kiedy komponenty są dobrze wymieszane. W przybliżeniu homogeniczna mieszanina jest uzyskiwana, jeśli bąbelki (kropelki) są małe w porównaniu z wielkością czujnika.

Na rysunku 11 przedstawiono wartości rozkładu pojemności mierzonej dla czujników z prostymi elektrodami i z elektrodami skreconymi o 180° . Dla czujnika z prostymi elektrodami można wyraźnie dostrzec odchylenia spowodowane odchyłką czułości zależną od pozycji w dwufazowej warstwie przepływu gazu i cieczy. W porównaniu z rozkładem czułości dla czujnika z elektrodami spiralnymi nie obserwuje się znaczącej zmiany czułości.



Rys. 10. Budowa czujnika do wyznaczania koncentracji



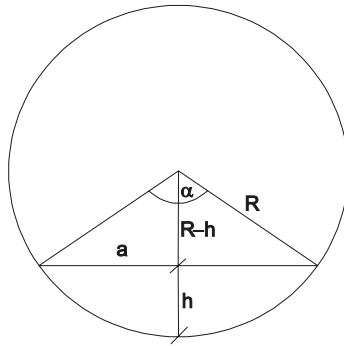
Rys. 11. Rozkład pojemności dla [8]: a) czujnika z płaskimi elektrodami pomiarowymi; b) czujnika z elektrodami skręconymi o 180°

W porównaniu z czujnikiem z elektrodami prostymi, czujnik z elektrodami spiralnymi umożliwia uzyskanie lepszych wyników pomiarowych. Jednak ma on pewne niepożądane efekty spowodowane elektrycznym polem generowanym w kierunku wzdłużnym do przepływu. Czułość takiego czujnika nie jest jednorodna w całym przekroju poprzecznym sekcji pomiarowej. Jest on znacznie bardziej czuły przy ściankach rurociągu niż w środku (rys. 11). Może to prowadzić do pewnych błędów pomiarowych przy przepływach korkowych i zafalowanych [8].

Wartość udziału objętościowego wyznaczono z geometrii koła, przy założeniu, że poziom cieczy jest taki sam na całej długości czujnika pomiarowego i ciecz stanowi regularny wycinek koła zgodnie z zapisem:

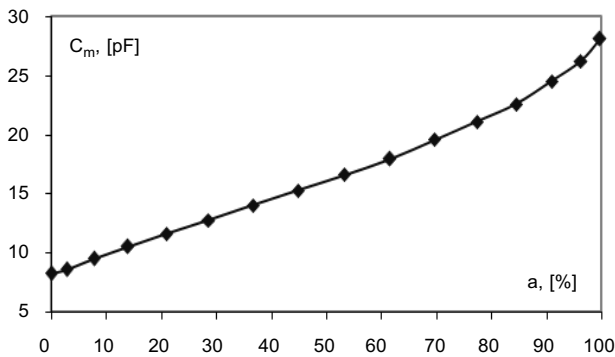
$$\alpha = \frac{A_c}{A} = \frac{\arccos\left(R - \frac{h}{R}\right)}{\pi} - \frac{R-h}{\pi R^2} \sqrt{2Rh - h^2} \quad (7)$$

Oznaczenia symboli przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Geometria układu do wyznaczania udziału objętościowego

Na stanowisku badawczym wykonano pięć serii pomiarów dla 16 poziomów napełnienia czujnika pomiarowego. Otrzymane wyniki przedstawiono na rysunku 13.



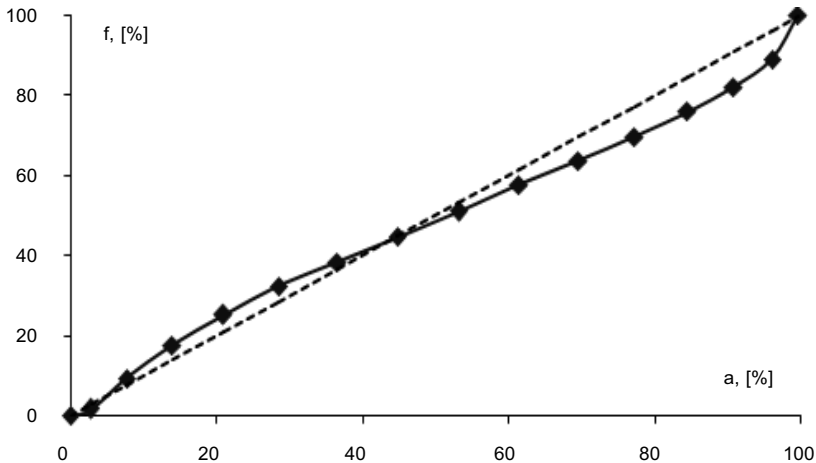
Rys. 13. Zależność pojemności od udziału objętościowego

Z uzyskanych wyników pomiarów wynika, że pojemność mierzona C_m zmienia się liniowo względem udziału objętościowego fazy ciekłej i gazowej. Pojemność zmierzono za pomocą mostka RLC typ MT4090 firmy MO-Tech przy częstotliwości pomiarowej – 100 Hz i napięciu 1 V. Pewne nieliniowości charakterystyki oraz występowanie pojemności początkowej przy udziale objętościowym równym zero są spowodowane występowaniem różnego rodzaju pojemności pasożytniczych związanych z układem pomiarowym.

W celu wyeliminowania wpływu pojemności pasożytniczych na wyniki pomiaru dalsze wartości odniesiono do tzw. znormalizowanej wartości pojemności, czyli odniesieniu zmian pojemności do wartości procentowych odpowiadających udziałowi objętościowemu poszczególnych faz. Normalizację przeprowadzono zgodnie z poniższym wzorem:

$$C_N = \frac{C_m - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (8)$$

Na rysunku 14 przedstawiono charakterystykę czujnika pomiarowego po znormalizowaniu pojemności mierzonej. Jak wynika z otrzymanej charakterystyki, nieliniowość zmian wynosi maksymalnie 13%. Stanowi to dużą wartość, którą można skorygować na drodze numerycznej, wprowadzając odpowiednią funkcję korekty. Zastosowanie w układzie pomiarowym dodatkowego przetwornika pomiarowego spowoduje wprowadzenie nieliniowości wynikającej z charakterystyki przetwornika, można zatem oczekiwać, że odpowiednio dobrany przetwornik pomiarowy może w znacznym stopniu skorygować nieliniowości czujnika na drodze sprzętowej, co znacznie uprości system pomiarowy. Wymaga to jednak przeprowadzenia szeregu badań mających na celu określenie najlepszego rozwiązania przetwornika pomiarowego. Dla przetwornika przedstawionego na rysunku 4 otrzymano następujące rezultaty. Na wykresie (rys. 14) wartość częstotliwości oznacza wielkość znormalizowaną, wyrażono ją w procentach. Linią przerywaną oznaczono idealną liniową charakterystykę przetwarzania. Dla rozpatrywanego układu, nieliniowości przetwarzania nie przekraczają 10%.



Rys. 14. Charakterystyka przetwarzania układu czujnika z przetwornikiem
pojemność na częstotliwość
Objaśnienia w tekście

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono dwa rozwiązania czujników do wyznaczania wartości udziału objętościowego gazu i cieczy w przepływie dwufazowym. Rozwiązanie oparte na tomografie pojemnościowym umożliwia nie tylko wyznaczenie udziału objętościowego, lecz również określenie struktury przepływu. Obarczone jest jednak znacznym błędem w przypadku wyznaczania wartości udziału dla małych koncentracji. Bardziej czułe i bardziej liniowe jest rozwiązanie oparte na czujniku z dwiema skręconymi elektrodami. Tego typu rozwiązanie nie umożliwia jednak określanie rodzaju struktury.

Praca powstała przy współfinansowaniu ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Unii Europejskiej oraz ze środków budżetu państwa.

Literatura

- [1] Tjugum S.A., Johansen G.A., *Multiphase Flow Regime Identification by Multibeam Gamma-Ray Densitometry*. 2nd World Congress on Industrial Process Tomography, Hannover, Germany, 29th–31st August 2001.
- [2] Rząsa M.R., *The Stand for Determination of Basic Parameters of Two-Phase Gas-Liquid Flows*. Zeszyty Naukowe PAN oddział w Katowicach nr 10, seria konferencje, Sympozjum nt. Pomiarów Dynamicznych, Szczyrk 7–8 November 2005.
- [3] Jaworek A., *Pojemnościowa metoda pomiaru zawartości faz w przepływie dwufazowym*. Pomiar Automatyka Kontrola 11/19.
- [4] Rząsa M.R., *Application of the capacity-to-frequency converter in the capacitance tomograph*. 4th World Congress on Industrial Process Tomography, Aizu, Japan, 2005.
- [5] Lionheart W.R.B., *Reconstruction algorithms for permittivity and conductivity imaging*. 2nd World Congress on Industrial Process Tomography” Hannover, Germany, 2001.
- [6] Yang W.Q., Peng L., *Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography*. Meas. Sci. Technol., vol. 14, No. 1, 2003.
- [7] Dugdale P., Green R.G., Hartley A.J., Jackson R.G., Landauro J., *Optical sensors for process tomography; „Tomographic techniques for process design and operation”*. M.S. Beck *et al.* Computational Mechanics Publications 1993.
- [8] Tollefsen J., Kolsrud T.R., Hammer E.A., *Tomometric Measurements Using Multi Electrode Capacitive Electrodes*. 1st International Symposium on Process Tomography in Poland, Jurata, May 18–19 2000.