

POLITECHNIKA OPOLSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
KATEDRA INŻYNIERII ŚRODOWISKA



mgr inż. Monika Wengel

**WPLYW ŚREDNICY MINIKANAŁU NA
HYDRODYNAMIKĘ PRZEPŁYWU GAZ-CIECZ**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Promotor: prof. dr hab. inż. Roman Ulbrich

OPOLE 2011

*Składam serdeczne podziękowania promotorowi,
Panu prof. dr hab. inż. Romanowi Ulbrichowi,
za merytoryczne ukierunkowanie pracy,
czas poświęcony przy jej realizacji i dużą życzliwość.*

*Podziękowania składam również wszystkim
pracownikom Katedry Inżynierii Środowiska
za wsparcie oraz udzielone wskazówki
podczas tworzenia pracy.*

Spis treści

Spis treści	2
Spis ważniejszych oznaczeń	4
1. Wprowadzenie	6
2. Charakterystyka hydrodynamiki przepływu dwufazowego w minikanalach	8
2.1. Klasyfikacja minikanalów	8
2.2. Struktury przepływu	14
2.3. Mapy przepływu	19
3. Przegląd literaturowy w zakresie przepływu mieszaniny dwufazowej w minikanalach	23
3.1. Zastosowanie minikanalów w procesach technologicznych	23
3.2. Badania wpływu średnicy minikanalu na hydrodynamikę przepływu	30
4. Podsumowanie	33
5. Cel i zakres pracy	34
6. Stanowisko pomiarowe	35
6.1. Charakterystyka urządzeń wykorzystywanych podczas badań własnych	40
7. Koncepcja i metodyka badań	42
7.1. Test stacjonarności.....	44
7.2. Dobór odpowiedniego obszaru badawczego	46
7.3. Ocena ewolucji struktur gazowych.....	48
7.4. Analiza obrazu	56
8. Wyniki badań własnych	58
8.1. Identyfikacja struktur przepływu	64
8.2. Ocena wpływu średnicy minikanalu na zakresy występowania struktur przepływu.....	77
8.3. Porównanie wyników badań własnych z mapą teoretyczną.....	86
8.4. Porównanie wyników badań własnych z danymi obcymi	92
8.5. Porównanie proponowanej mapy własnej z mapami uniwersalnymi dla minikanalów.....	106
8.6. Model poślizgu faz w minikanalach	108
9. Podsumowanie i wnioski końcowe	130
10. Literatura	131

Spis ważniejszych oznaczeń

- a – szerokość przekroju poprzecznego kanału, m
- b – wysokość przekroju poprzecznego kanału, m
- C_0 – parametr rozkładu, -
- C_{Kon} – parametru rozkładu dla kanałów konwencjonalnych
- D – średnica kanału, m
- D_{gr} – średnica graniczna minikanalu, m
- D_h – średnica hydrauliczna przewodu, m
- D_r – średnica reprezentatywna dla kanałów konwencjonalnych, m
- f_s – częstotliwość próbkowania obrazu, Hz
- g – przyspieszenie ziemskie, m/s^2
- L – długość przewodu, m
- l – odległość pomiędzy obszarami pomiarowymi, m
- p – ciśnienie, Pa,
- p^k – wartość jasności piksela
- $R_{x,y}$ – korelacja wzajemna sygnałów x i y, czyli poziomów szarości w obszarach badawczych, -
- S – współczynnik poślizgu faz,-
- T – czas, s
- t – temperatura, °C
- w – prędkość, m/s
- w_{dr} – prędkość poślizgu, m/s
- w_g – rzeczywista prędkość gazu, m/s
- w_{sg} – prędkość pozorną gazu, m/s
- w_{sl} – prędkość pozorną cieczy, m/s
- w_T – prędkość pozorną mieszaniny, m/s
- x – udział masowy jednej z faz,-
- X_{LM} – parametr Lockharta–Martinelliego,-

Moduły bezwymiarowe:

- Bo – liczba Bonda, zdefiniowana równ. (2-10)
Ca – liczba kapilarna, zdefiniowana równ. (2-5)
Con – liczba ograniczająca, zdefiniowany równ. (2-8)
Eö – liczba Eötvösa, zdefiniowana równ. (2-9)
Re – liczba Reynoldsa, zdefiniowana równ. (2-3) i (2-5)
We – liczba Webera, zdefiniowana równ. (2-1) i (2-2)

Symbole greckie:

- α – udział objętościowy jednej z faz, -
 β – poziom istotności, -
 λ – stała Laplace'a, -
 η – współczynnik lepkości dynamicznej, Pa·s
 ρ – gęstość, kg/m³
 σ – napięcie powierzchniowe, N/m
 τ – czas opóźnienia sygnału, s
 ξ – wlotowy udział fazy w mieszaninie, -

Indeksy:

g– gaz

l– ciecz

r – odnosi się do długości w której dokonywano rejestracji obrazu, m

obl– obliczony

zm– zmierzony

1. Wprowadzenie

Znajomość hydrodynamiki przepływu dwufazowego gaz–ciecz w minikanalach ma fundamentalne znaczenie, gdyż przepływy te występują w wielu interesujących aplikacjach, takich jak chłodzenie elementów elektroniki, urządzeniach takich jak kompaktowe wymienniki ciepła, technice kosmicznej czy zagadnieniach bioinżynierii i biotechnologii oraz w procesach przetwarzania materiałów czy minireaktorach. Bardzo wiele ośrodków zajmuje się obecnie konstrukcją i eksploatacją kompaktowych urządzeń, których elementy składowe stanowią przewody o małych średnicach zwykle mini- i mikrokanaly. Jest to zgodne z trendem XXI wieku, zmierzającym do zastosowania urządzeń technicznych energooszczędnych i przyjaznych środowisku. Dlatego istotnego znaczenia nabiera miniaturyzacja, która obejmuje wszystkie elementy składowe urządzeń, w których występuje przepływ dwufazowy np. wymienniki ciepła (parowniki i skraplacze), a także układy sterowania i monitorowania. Rozwiązania konstrukcyjne tych urządzeń zostały przedstawione szerzej w rozdziale 3.

W pracy podjęto się oceny hydrodynamiki przepływu gaz–ciecz w minikanalach, ponieważ pozwala to na optymalizację oszczędzania materiałów i energii zarówno na etapie projektowania, budowy jak i eksploatacji maszyn. Badania przeprowadzono w pięciu minikanalach o średnicach hydraulicznych od 2 do 6 mm, gdyż przewody właśnie o takich wymiarach są powszechnie stosowane w kompaktowych wymiennikach ciepła, a brak jest jednoznacznych metod obliczania procesu transportu pędu i ciepła.

Analiza aktualnego, już dość obszernego, stanu wiedzy dotycząca badań hydrodynamiki przepływu mieszanin dwufazowych gaz–ciecz w minikanalach wykazuje, że żadne z podstawowych parametrów takiego przepływu, a więc udziały objętościowe faz, czy też warunki formowania się struktur przepływu nie zostały zadowalająco opracowane. Warto podkreślić, że struktury przepływu są jednym z najważniejszych parametrów w przypadku realizacji przepływu dwufazowego, wpływają bowiem w zasadniczy sposób na zjawiska przenoszenia pędu, ciepła i masy, determinując tok obliczeń takich wielkości jak wartość udziału faz, czy oporów przepływu, na co zwraca uwagę wiele autorów min.: Dziubiński i Prywer [18], Waelchli i Rohr [85] i Yang i Shieh [95].

Pomimo, że w zastosowaniach praktycznych zwykle ma miejsce przepływ w układzie minikanalów, to jednak aby dostarczyć informacji w celu dogłębnego

i właściwego zrozumienia mechanizmów zachodzących podczas przepływów gaz-ciecz, w pierwszej kolejności podejmuje się badania w pojedynczym minikanale. Badania zrealizowano w warunkach przepływu adiabatycznego. Takie podejście w stosunku do podjętej tematyki jest typowe i szeroko stosowane w różnych ośrodkach badawczych czego przykładem mogą być prace wielu badaczy jak np.: Dutkowskiego [17], Kozulina i Kuznetsova [38], Morela i innych [53], Revellina i Thome'a [66], Simy i innych [71], Tripletta i innych [78] oraz Tsofigkasa i innych [81]. Prezentowana praca stanowi próbę usystematyzowania wiedzy i wyciągnięcia praktycznych wniosków na podstawie badań własnych oraz studiów literaturowych.

2. Charakterystyka hydrodynamiki przepływu dwufazowego w minikanalach

2.1. Klasyfikacja minikanalów

Jednym z najistotniejszych a zarazem podstawowych zagadnień hydrodynamiki przepływu dwufazowego w kanałach, było określenie kryterium podziału kanałów w zależności od ich średnicy.

Przedstawienie charakterystyki przepływu dwufazowego gaz-ciecz w rzeczywistych urządzeniach technicznych z kanałami o wymiarach konwencjonalnych jest zwykle opisywane za pomocą liczb bezwymiarowych. W literaturze przedmiotu istnieje wiele kryteriów określających wielkość mini i mikrokanalów, mimo to klasyfikacja ta nie jest jeszcze jednoznacznie zdefiniowana. Brak porozumienia odnośnie klasyfikacji powoduje trudności w porównaniu danych doświadczalnych, szczególnie w przypadku występowania różnych płynów lub też różnych warunków w badaniach doświadczalnych. Wielu naukowców uważa, że kryterium podziału kanałów powinno być oparte na kombinacji nie tylko ich wielkości, ale także właściwości fizycznych płynu. Bywa również tak, że klasyfikacja kanału jest opisywana za pomocą kilku bezwymiarowych parametrów charakteryzujących przepływ mieszaniny dwufazowej gaz-ciecz [8],[23],[34],[74]. Clayton i Crowe [13] mianem mikrokanalów przyjmują nazywać przewody w oparciu o pięć następujących modułów bezwymiarowych, które są zdefiniowane następująco:

- liczba Webera dla prędkości pozornej cieczy: $We_{sl} = \frac{w_{sl}^2 D_h \rho_l}{\sigma} \ll 1$ (2-1)

- liczba Webera dla prędkości pozornej gazu: $We_{sg} = \frac{w_{sg}^2 D_h \rho_g}{\sigma} \ll 1$ (2-2)

- liczba Reynoldsa dla prędkości pozornej cieczy: $Re_{sl} = \frac{w_{sl} D_h \rho_l}{\eta_l} < 2000$ (2-3)

- liczba Reynoldsa dla prędkości pozornej gazu: $Re_{sg} = \frac{w_{sg} D_h \rho_g}{\eta_g} < 2000$ (2-4)

- liczba kapilarna: $Ca_l = \frac{\eta_l w_{sl}}{\sigma} \ll 1$ (2-5)

gdzie D_h , w_{sl} , w_{sg} , g , η , σ , ρ to odpowiednio, średnica hydrauliczna kanału, prędkość pozorna cieczy i gazu oraz przyspieszenie ziemskie, a także współczynnik lepkości dynamicznej, gęstość i napięcie powierzchniowe.

Moduły te określają warunki przepływu w tym zakresie średnic kanału, gdzie przepływ gaz-ciecz zdominowany jest przez napięcie powierzchniowe.

Shah [68] zdefiniował kompaktowy wymiennik ciepła jako taki, w którym stosunek powierzchni wymiany ciepła do objętości jest większy od $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Próg ten w odniesieniu do średnicy kanału wynosi 6 mm, co oznacza że jest to wartość graniczna pomiędzy kanałem normalnym a minikanalem.

Mehendale i inni [49] zaproponowali podział według średnicy hydraulicznej kanału, przedstawiający się następująco:

- mikrokanal $1 \mu\text{m} < D_h < 100 \mu\text{m}$,
- kanal przejściowy $100 \mu\text{m} \leq D_h < 1 \text{ mm}$,
- minikanal, kanal kompaktowy $1 \text{ mm} \leq D_h \leq 6 \text{ mm}$
- kanal konwencjonalny $D_h > 6 \text{ mm}$.

Również zgodnie z tym podziałem, wymiarem granicznym pomiędzy kanałami normalnymi a minikanalami jest 6 mm.

Kolejnym kryterium jest podział według średnicy hydraulicznej kanału, zaproponowany przez Kandlikara i Grande [32]:

- kanal konwencjonalny $D_h > 3 \text{ mm}$,
- minikanal $200 \mu\text{m} < D_h \leq 3 \text{ mm}$,
- mikrokanal $10 \mu\text{m} < D_h \leq 200 \mu\text{m}$.
- kanal przejściowy $0,1 \mu\text{m} < D_h \leq 10 \mu\text{m}$,
- kanal molekularny $D_h \leq 0,1 \mu\text{m}$.

Powyższe kryterium podziału kanałów jest przyjmowane w wielu pracach badawczych. Podział ten Kandlikar i Grande [32] przedstawili w oparciu o praktykę inżynierską i obszar zastosowań taki jak przemysł chłodniczy o małym tonażu urządzeń, kompaktowe parowniki występujące w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym oraz zastosowanie w obszarze mikroelektroniki i zintegrowanych układów elektro-mechanicznych (MEMS). Ponadto, o czym już wspomniano wcześniej, istnieje kilka ważnych liczb bezwymiarowych, które przedstawiają charakter przepływu płynu w minikanalach. W oparciu o te liczby bezwymiarowe, można odpowiednio sklasyfikować kanały, kilka z nich postanowiono przedstawić bliżej.

Triplett i inni [79] mianem minikanalów nazywają przewody o średnicy zastępczej zbliżonej lub mniejszej od stałej Laplace'a:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}} , \quad (2- 6)$$

gdzie σ , ρ_l , ρ_g to odpowiednio napięcie powierzchniowe, gęstość cieczy i gazu. Suo i Griffith [74] zaproponowali kryterium określające maksymalną średnicę mikrokanалу D przez stosunek:

$$\lambda / D > 3,3 \quad (2-7)$$

Dla mieszaniny woda-powietrze pod ciśnieniem atmosferycznym maksymalna średnica minikanalu według równania (2-6) wynosi 2,73 mm, natomiast według równania (2-7) 0,82 mm.

Z kolei Kew i Cornwell [36] zaproponowali największą liczbę ograniczającą przedział minikanalów Con jako:

$$Con = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)D_h^2}} \quad (2-8)$$

Stwierdzili oni, że gdy liczba ograniczająca Con jest większa od 0,5 to przepływ dwufazowy wykazuje inną charakterystykę przepływu i transportu ciepła niż w kanałach konwencjonalnych.

Jeszcze inne kryterium zaproponowali Brauner i Moalem-Marón [8] według liczby Eötvösa:

$$Eö = \frac{(2\pi)^2 \sigma}{(\rho_l - \rho_g)D_h^2 g} > 1. \quad (2-9)$$

Autorzy ci podają, że kiedy wartość liczby Eötvösa jest większa od 1, wtedy w przepływie dominuje napięcie powierzchniowe, dlatego liczba ta pozwala wyznaczyć granicę między minikanalami a kanałami konwencjonalnymi.

Triplett i inni [79] po przeprowadzeniu badań w kanałach okrągłych o średnicy $D=1,1$; 2,01; 2,88 i 4,26 mm stwierdzili, że przepływ warstwowy staje się niemożliwy gdy liczba Eötvösa jest większa od 100 ($Eö > 100$). Tym samym określili kryterium podziału między minikanalami a kanałami konwencjonalnymi, gdyż brak występowania struktury warstwowej w poziomym przepływie dwufazowym jest cechą charakterystyczną minikanalów [15],[21].

Natomiast Akbar i inni [1] podsumowali wcześniejsze badania i wywnioskowali, że wpływ wyporu jest znikomy kiedy liczba Bonda spełnia warunek:

$$Bo = \sqrt{\frac{\Delta\rho g D_h^2}{\sigma}} < 0,3 \quad (2-10)$$

Dla tak zdefiniowanego warunku na przepływ dwufazowy nie na wpływu orientacja kanału, czyli dla $Bo < 0,3$ przewód w którym występuje przepływ będzie nazywany minikanalem. Wszystkie liczby kryterialne Con , $Eö$ i Bo zawierają wpływ gęstości płynu, napięcia powierzchniowego i rozmiaru kanału na przepływ dwufazowy, dlatego występuje dość duża rozbieżność w określeniu średnicy kryterialnej, szczególnie biorąc pod uwagę $Eö=1$, gdzie dla wody i powietrza maksymalna średnica minikanalu mieści się w zakresie od 0,82 do 17,15 mm (Tabela 2.1).

Tabela 2.1. Wybrane kryteria dla minikanalów [9]

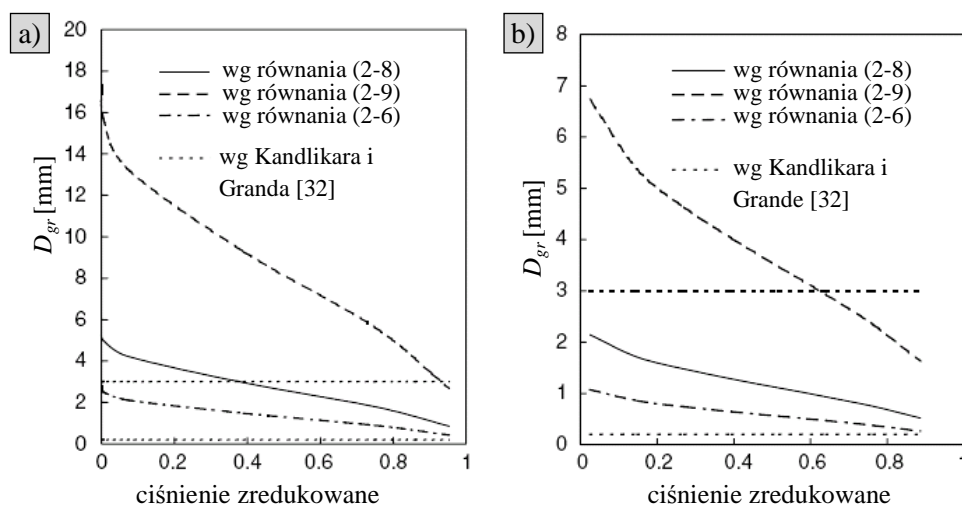
		powietrze/woda		R134a	
Ciśnienie [MPa]		0,10	0,60	1,00	1,40
Temperatura [°C]		20,0	21,6	39,4	52,5
Napięcie powierzchniowe [N/m]		0,073	0,00839	0,00615	0,00461
Gęstość [kg/m ³]	gazu	1,16	29,04	49,06	70,70
	cieczy	998,0	1218,2	1148,3	1090,2
Przyspieszenie ziemskie [m/s ²]		9,81			
Średnica graniczna minikanalu D_{gr} [mm]					
$Eö=1$ wg [8]		17,10	5,30	4,70	4,30
$Con=0,5$ wg [36]		5,40	1,70	1,50	1,40
$Eö=100$ wg [79]		1,71	0,53	0,47	0,43
$Bo=0,3$ wg [1]		0,81	0,25	0,23	0,20

Cheng i Mewes [11] biorąc pod uwagę wpływ właściwości fizycznych płynów, w oparciu o równania (2-6), (2-8) i (2-9) i kryterium podziału według Kandlikara i Grande [32], wyznaczyli granice przejścia między minikanalami a kanałami normalnymi. Autorzy wybrali cztery płyny jednorodne i cztery, które były mieszaniną kilku płynów i zostały przedstawione w tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Właściwości fizyczne płynów wg [11]

Płyn	Skład procentowy	Ciśnienie krytyczne [MPa]	Temperatura krytyczna [°C]
Woda	100 % woda	22,1	374
R134a	100 % R134a	4,06	101,1
R22	100 % R22	4,99	96,2
CO ₂	100 % CO ₂	7,38	31,1
R404a	44% R125 52% R143a 4% R134a	3,74	72,2
R407c	23% R32 25% R125 52% R134a	4,63	86,1
R410a	50% R32 50% R125	4,77	70,1
R507a	50% R125 50% R143a	3,72	70,7

W przeciwieństwie do kryterium wyznaczonego według Kandlikara i Grande [32] progowa granica minikanалу wyznaczona dla liczb bezwymiarowych (2-6), (2-8) i (2-9) maleje wraz ze zmniejszaniem ciśnienia oraz znaczny wpływ na nią wywierają właściwości fizyczne poszczególnych płynów (Rys. 2.1).



Rys. 2.1. Porównanie różnych kryteriów podziału minikanatów dla:
a) wody; b) R134a wg [11]

Zgodnie z równaniem (2-8) maksymalna progowa wartość średnicy minikanalu wynosi 5 mm, podczas gdy dla płynu R134a–2,3 mm, natomiast biorąc pod uwagę wszystkie kryteria, wartość granicy progowej minikanalu dla wody mieści się w zakresie od 3 mm do

15,8 mm, i od 1 mm do 6,8 mm dla płynu R134a (*Rys. 2.1*). Z powodu dużych różnic między wartościami średnic progowych dla wyznaczonych liczb bezwymiarowych (2-6), (2-8) i (2-9) Cheng i Mewes [11] nie zalecają ich stosowania do minikanalów, jednocześnie średnicę hydrauliczną kanału równą 6 mm przyjmują jako maksymalną wartość graniczną pomiędzy minikanalem a kanałem normalnym.

Dlatego, że określenie średnicy kryterialnej za pomocą liczb bezwymiarowych jest dość kłopotliwe większość autorów przyjmuje kryterium zaproponowane przez Kandlikara i Grande [32], jednakże dopóki klasyfikacja kanału jest tematem otwartym w literaturze przedmiotu można przyjąć, że istnieją różne metody ich klasyfikacji. Dlatego, niektórzy badacze przyjmują maksymalną średnicę hydrauliczną $D_h=6$ mm np. Cheng i Mewes [11] czy Wölk i inni [92], a Wongwises i inni [93] przyjmują $D_h=7,5$ mm. Po przeprowadzeniu przeglądu literaturowego w niniejszej pracy przyjęto podział według którego $D_h=6$ mm jest maksymalną średnicą minikanalu, zgodnie z kryteriami przedstawionymi w pracach Chenga i Mewesa [11], Mehendale i innych [49] oraz Shaha [68]. Ze względu na bardzo złożony i nadal nie w pełni zbadany mechanizm przepływu mieszanin dwufazowych w mikro- i minikanalach przyjęte założenie należy traktować jako orientacyjne.

2.2. Struktury przepływu

Jednym z podstawowych celów oceny hydrodynamiki przepływu dwufazowego jest określenie rozkładu koncentracji faz w przestrzeni kanału, czyli określenie tzw. struktur przepływu. Wiadomym jest również, że struktura przepływu dwufazowego warunkuje w dużym stopniu tok obliczeń takich wielkości jak: udział faz przepływającej mieszaniny, opory przepływu, współczynnik wnikania ciepła i masy, czyli że wraz ze zmianą struktury przepływu następuje zmiana właściwości hydrodynamicznych mieszaniny dwufazowej. W związku z tym niezbędne jest uzyskanie możliwości przewidywania struktur dla danych parametrów przepływu. Tak więc określenie rodzaju struktury występującej w danym przepływie odgrywa kluczową rolę i jest zagadnieniem o podstawowym charakterze przy obliczeniach projektowych.

Istnieje cały szereg klasyfikacji struktur, a najczęściej cytowaną w literaturze dla przepływu wznoszącego mieszaniny dwufazowej gaz–ciecz w pionowych kanałach konwencjonalnych jest klasyfikacja zaproponowana przez Nicklina i Davidsona [55]. Według tego podziału w przepływie dwufazowym w kanałach o dużych średnicach występuje pięć struktur przepływu a mianowicie: pęcherzykowa, tłokowa, pianowa, pierścieniowa i mgłowa. Większość tych struktur przepływu występuje również w minikanalach, trzeba jednak zauważyć, iż Hassan i inni [27] stwierdzają, że pomimo iż zostały one podobnie nazwane istnieje pewna różnica pomiędzy nimi. Również obok klasycznych struktur pojawiają się nie obserwowane w kanałach konwencjonalnych struktury przepływu jak np. przepływ pęcherzykowo–rzutowy (ang. bubbly–train slug czy cap–bubbly flow), przepływ pierścieniowo–rzutowy, odmiana przepływu pęcherzykowego (ang. capillary bubble flow), przepływ rzutowo–kropelkowy (ang. slug–droplet flow) i pierścieniowo–kropelkowy (ang. annular–droplet flow) [20]. Różnorodność struktur, powoduje duże trudności w usystematyzowaniu tego aspektu przepływu dwufazowego, a problem ten poruszany był przez wielu autorów min.: Damianidesa i Westwatera [15], Dziubińskiego [19], Hassana i innych [27], Kandlikara [31], Shao i innych [70] oraz Wengel [89]. Autorzy ci jednoznacznie dochodzą do wniosku że różnorodność ta powoduje duże trudności w porównywaniu opublikowanych danych doświadczalnych. Oya [58] preferuje szczegółową klasyfikację i w swoich badaniach zidentyfikował następujące struktury:

- pęcherzykowa (ang. simple bubble),
- pęcherzykowo–ziarnista (ang. granularlumpy bubble),

- rzutowa (ang. simple slug i fish-scale slug),
 - tłokowa (ang. piston i long piston),
 - pianowa (ang. froth),
 - pierścieniowa (ang. annular).
- } struktura przejściowa

Barnea i inni [5] przedstawili następującą klasyfikacją struktur przepływu:

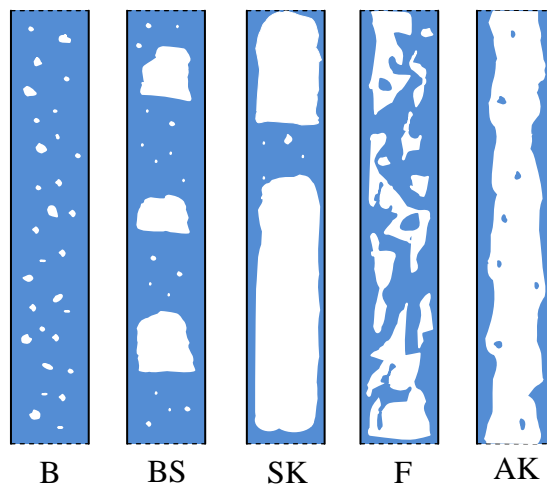
- pęcherzykowo-dyspersyjna (ang. dispersed bubble),
 - wydłużonych pęcherzyków (ang. elongated bubble),
 - rzutowa (ang. slug),
 - pianowa (ang. churn),
 - pierścieniowa (ang. annular)
- } struktura przejściowa

Fukano i Kariyasaki [21] przedstawili tylko trzy struktury przepływu:

- pęcherzykowo-dyspersyjna (ang. dispersed bubble),
- przejściowa (ang. intermittent),
- pierścieniowa (ang. annular).

Dziubiński [19] przedstawia następujące struktury przepływu w minikanalach pionowych (Rys. 2.2):

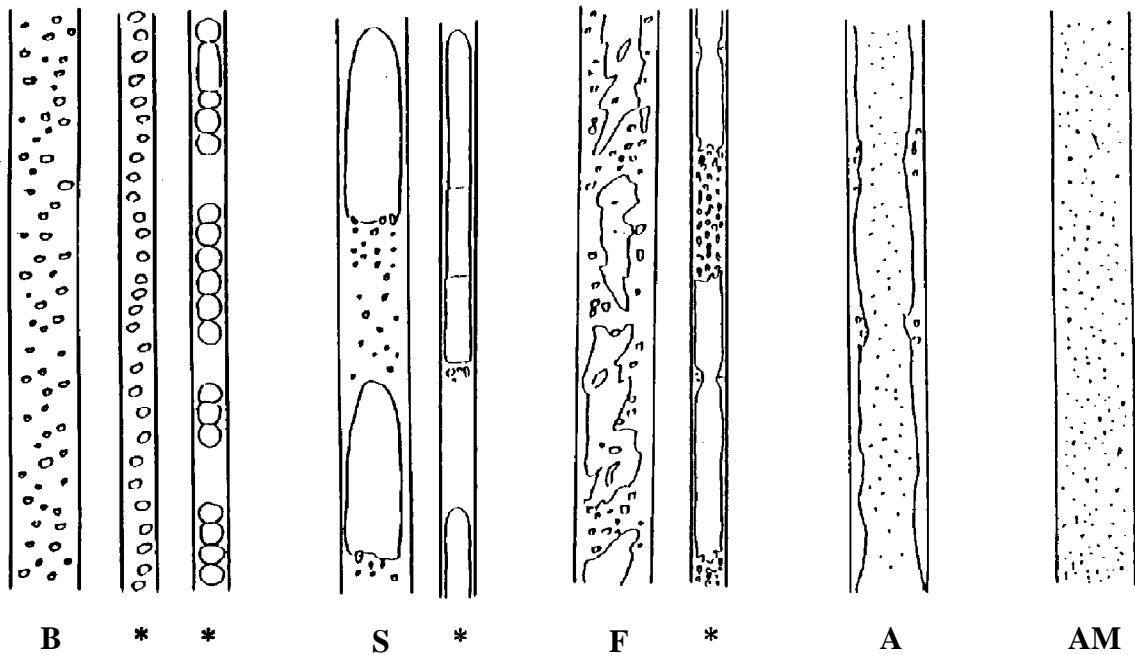
- pęcherzykowa B (ang. bubbly),
- pęcherzykowo-rzutowa BS (ang. bubbly-train slug),
- rzutowa SK (ang. slug),
- pianowa F (ang. froth),
- pierścieniowo-kropelkowa AK (ang. annular-droplet flow).



Rys. 2.2. Obserwowane struktury przepływu w minikanalach pionowych wg [19]

Mishima i Hibiki [51] dokonali następującej klasyfikacji struktur (Rys. 2.3):

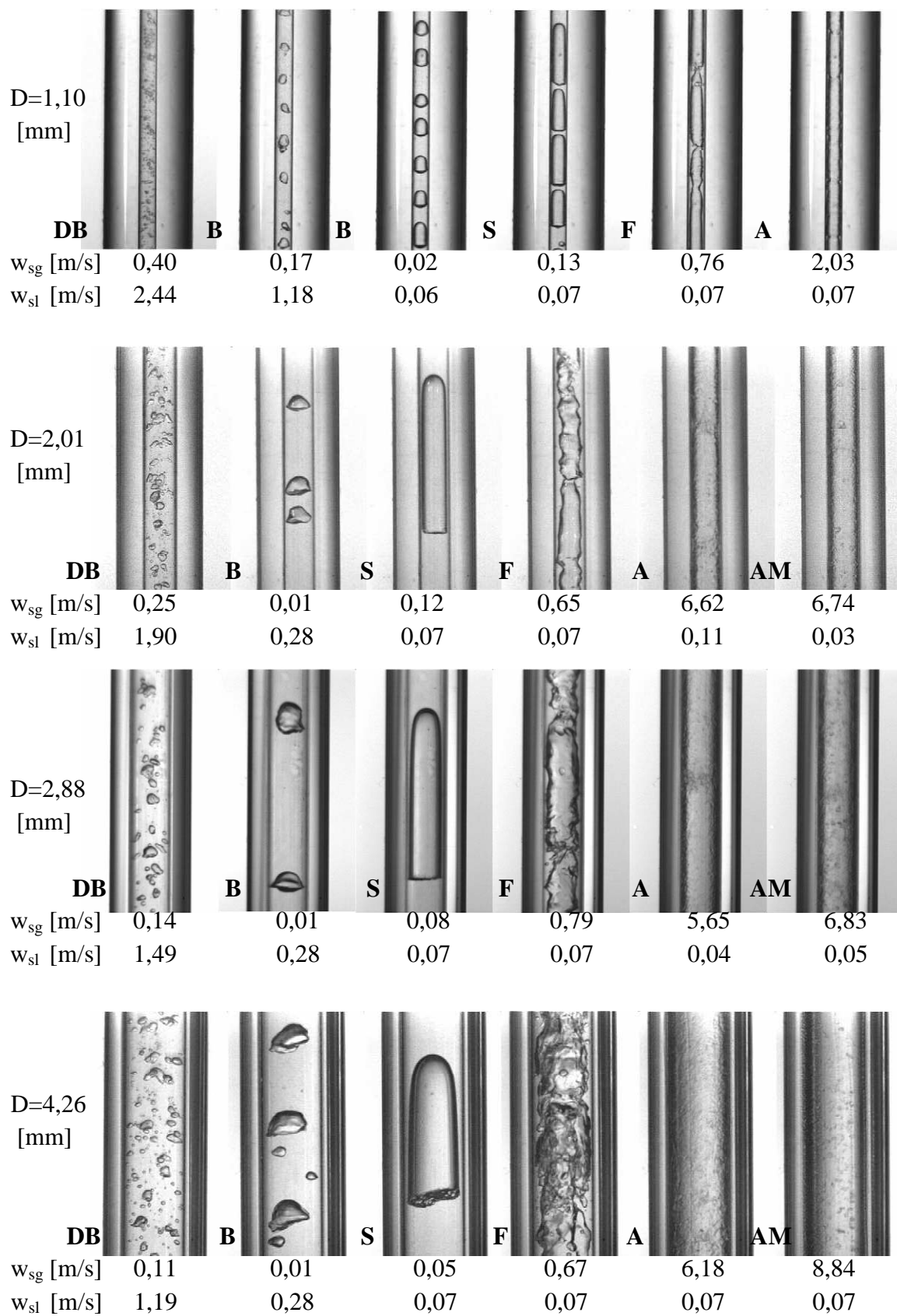
- pęcherzykowa B (ang. bubbly),
 - rzutowa S (ang. slug),
 - pianowa F (ang. churn),
 - pierścieniowa A (ang. annular),
 - pierścieniowo–mgłowa AM (ang. annular–mist flow).
- } struktura przejściowa



Rys. 2.3. Obserwowane struktury przepływu w minikanalach pionowych wg [51]

Gwiazdka pod rysunkiem odnosi się do minikanalów, natomiast brak oznaczenia – do przepływu zarówno w minikanalach, jak i kanałach konwencjonalnych. Poprzez tę graficzną interpretację autorzy w sposób ideowy przedstawili podstawowe różnice w rodzaju formującej się struktury przepływu w mini- i makrokanalach.

Badania przeprowadzone przez Chena i innych [9] w minikanalach rurowych o średnicy $D \in (1,10 \div 4,26)$ mm, są przykładem badań, które przedstawiają pewną odmienność struktur powstających w minikanalach i kanałach o dużej średnicy (Rys. 2.4), na co także wcześniej zwrócono uwagę w pracy [88].



Rys. 2.4. Przykładowe obrazy zarejestrowanych przepływów wg [9]

Biorąc pod uwagę wymienione wyżej prace oraz nazewnictwo przedstawione w pracy Furukowa i Fukano [22] szczegółowy opis struktur przepływu w minikanalach można przedstawić następująco:

- przepływ pęcherzykowo-dyspersyjny **DB** (ang. dispersed bubble flow) – liczne małe pęcherzyki unoszą się w ciągłej fazie ciekłej,
- przepływ pęcherzykowy **B** (ang. bubble flow) – mniejsze pęcherzyki koncentrują się wzdłuż osi kanału, jeden za drugim wznoszą się spiralnie, natomiast większe pęcherzyki o średnicy zbliżonej do średnicy minikanalu łączą się ze sobą tworząc tzw. pociąg pęcherzyków; w przypadku minikanalów porcje gazu łączą się nawzajem z tylko cienkim filmem separującym je, tworząc przepływ pęcherzykowo-rzutowy (ang. bubble-train slug flow), który nie występuje w kanałach konwencjonalnych,
- przepływ rzutowy **S** (ang. slug flow) – pęcherze gazowe są stosunkowo dłuższe, ich czoło jest zaokrąglone przeważnie przybiera kształt elipsoidalny, charakteryzuje się naprzemiennym przepływem porcji gazu i cieczy, przy czym średnica pęcherza jest zbliżona do średnicy kanału, a długość ich, w zależności od danej średnicy hydraulicznej, może dochodzić do kilkunastu centymetrów, natomiast bezpośrednio za porcją gazu czasami pojawiają się strefy lokalnej cyrkulacji, przepływ ma charakter pulsacyjny, w długich pęcherzach gazu zauważa się cienkie filmy cieczy,
- przepływ pianowy **F** (ang. froth flow) – ma miejsce przy wzrastającej prędkości gazu, która powoduje pękanie, rozrywanie i deformację pęcherzy gazowych, ruch cieczy staje się oscylacyjny i nieorientowany oraz powoduje chaotyczne przemieszczanie obu faz,
- przepływ pierścieniowy **A** (ang. annular flow) – przy zwiększaniu prędkości powietrza i małej ilości wody następuje wydłużanie pęcherzy gazowych i przerywanie dzielących je przegród, ciecz przepływa w postaci cienkiej warstewki na ściance kanału, a gaz ze znaczną prędkością środkiem przewodu,
- przepływ pierścieniowo – mgłowy **AM** (ang. annular – mist flow) – ciecz płynie po ściance w postaci cienkiej warstewki lub w ogóle nie występuje, natomiast gaz z dużą prędkością przepływa środkiem kanału, przy czym w fazie gazowej można wyróżnić drobne kropelki cieczy.

Z przedstawionych danych literaturowych wynika, że z jednej strony zaobserwowane struktury przepływu gaz–ciecz w minikanalach można sklasyfikować podobnie jak w kanałach normalnych, a z drugiej mogą występować różnorodne formy przepływu nie spotykane wcześniej w kanałach konwencjonalnych. Natomiast sposób ich identyfikacji i opisu wskazuje z jednej strony na złożoność zagadnienia, a z drugiej strony brak jednoznaczności w opisie tworzących się struktur. Powoduje to, że podobnie jak w przypadku przewodów o dużych rozmiarach, podejmowane są próby opracowania map przepływu mieszanin dwufazowych także w minikanalach.

2.3. Mapy przepływu

Zakresy występowania poszczególnych struktur przepływu dwufazowego są przedstawiane na tzw. mapach przepływu. Powierzchnia takich map jest podzielona liniami granicznymi na obszary, w których występuje, a ściślej określając: dominuje jedna określona struktura przepływu dwufazowego. Na osiach rzędnych i odciętych zazwyczaj umieszczane są prędkości lub strumienie masowe faz lub ich właściwości fizyczne takie jak: lepkość, gęstość, czy napięcie powierzchniowe. Przez linie rozdziału na mapach przepływu rozumie się pewne wąskie pasmo obszaru mapy i nie należy ich traktować jako ścisłe granice pomiędzy jedną strukturą a drugą ze względu na to, że w rzeczywistych przepływach tworzą się struktury przejściowe, które w swej charakterystyce wiążą właściwości obu rodzajów przepływu [19]. Mapy powstają w oparciu o badania empiryczne lub modelowanie matematyczne. W przypadku map powstających w oparciu o modelowanie matematyczne, linie graniczne, oddzielające zakresy występowania określonych struktur są opisane za pomocą równań, w których zawarte są informacje między innymi o właściwościach faz, a także średnicy kanału, przez który odbywa się badany przepływ. Dla kanałów o średnicach konwencjonalnych opracowanych już wiele takich map przepływu, natomiast dla minikanalów nie, dlatego w literaturze często mapy zaproponowane dla kanałów konwencjonalnych są poddawane weryfikacji pod względem możliwości ich zaadoptowania do warunków przepływu dwufazowego w minikanalach. Wstępną weryfikację modeli teoretycznych przedstawiono w pracach: [63] i [65], wykazując znaczący wpływ średnicy kanału na zakres występowania poszczególnych struktur przepływu. Warto tutaj zauważyć, iż w przypadku porównania modelu teoretycznego Taitela i innych [76] przewidującego kształt i położenie linii granicznych

mapy z danymi doświadczalnymi dla minikanalów, jedni badacze jak np.: Triplett i inni [79] czy Xu i inni [94] przedstawiają, że modele te całkowicie zawodzą, natomiast Barnea i inni [5] uważają, że można je z powodzeniem stosować w minikanalach. Dlatego, ze względu na tę istniejącą rozbieżność w wynikach różnych badaczy, zaobserwowane podczas badań własnych struktury przepływu, przedstawione na mapach przepływu w celu łatwego odczytania parametrów hydrodynamicznych przepływu, zdecydowano porównać z mapą Taitela i innych [76]. Mapa ta jest jedną z najczęściej cytowanych w literaturze map przepływu i sprawdzoną dla przepływu w kanałach konwencjonalnych.

Ponadto w literaturze istnieje szereg map, które zostały opracowane na podstawie badań empirycznych, zgodność danych doświadczalnych poszczególnych map z danymi doświadczalnymi autorów, którzy te mapy zaproponowali jest wysoka dla przepływu dwufazowego. Natomiast porównanie różnych map przepływu wskazuje na spore rozbieżności pomiędzy nimi [19].

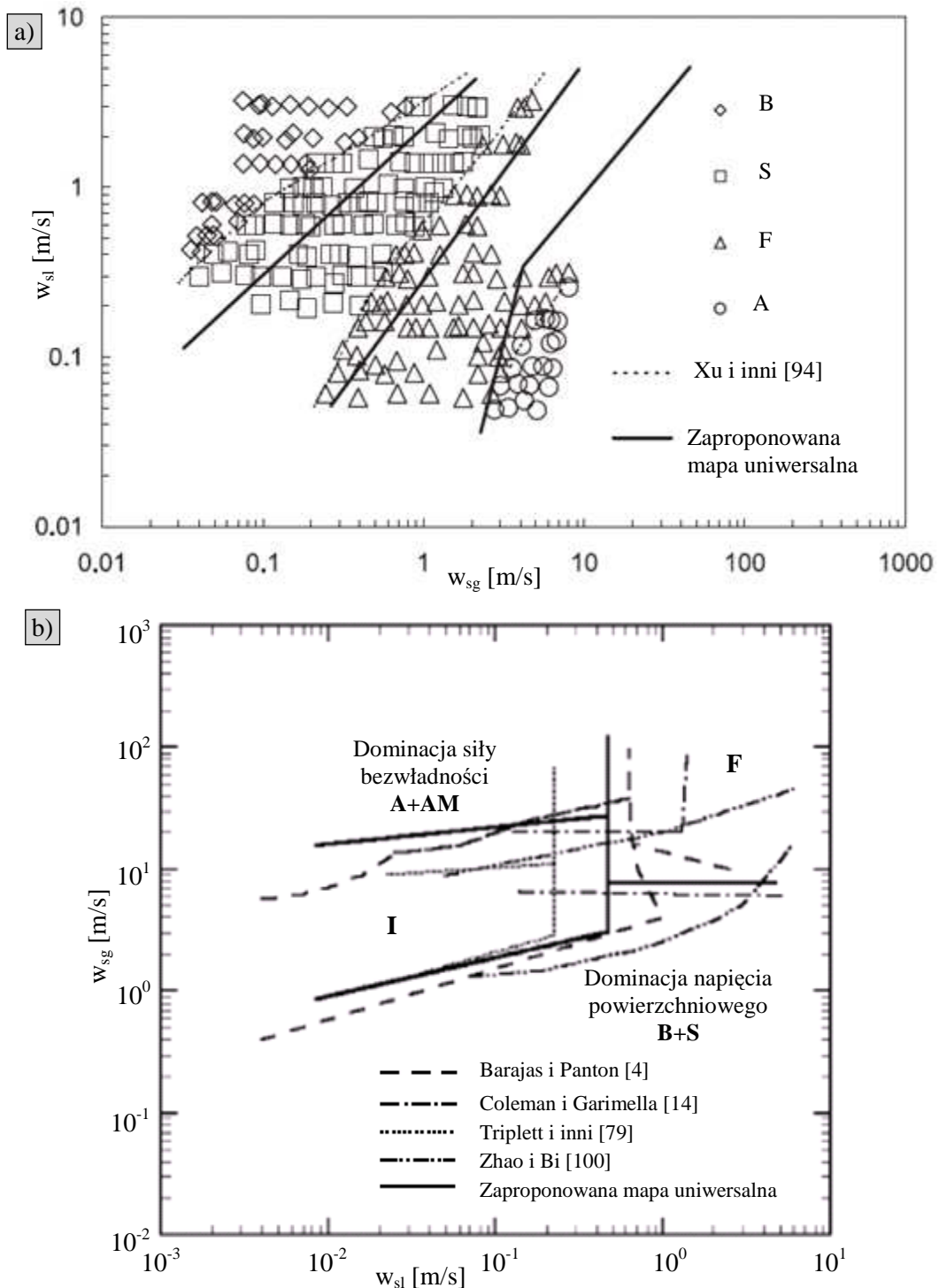
Po przeprowadzeniu weryfikacji eksperymentalnej postanowiono wykorzystać do dalszej analizy następujące mapy stworzone na podstawie badań empirycznych w minikanalach:

- Chena i innych [9],
- Fukano i Kariyasaki [21],
- Ide i innych [30],
- Zhao i Bi [100],
- Barnea i innych [5],
- Wólka i innych [92].

Opis wymienionych powyżej map oraz ich porównanie z wynikami badań własnych przedstawiono w rozdziale 8.4.

W literaturze przedmiotu istnieją również dwie mapy przepływu, które autorzy przedstawili jako mapy uniwersalne dla przepływu w mini i mikrokanałach. Pierwsza z nich to mapa autorstwa Hassana i innych [27],[28] natomiast druga mapa autorstwa Akbara i innych [1]. Obie mapy zostały stworzone przez autorów na podstawie eksperymentalnej analizy wcześniejszych danych literaturowych (*Rys. 2.5*). Hassan i inni [27] zaproponowali uniwersalną mapę dla wznoszącego kierunku przepływu, bazując na danych o średnicy hydraulicznej od 0,5 do 1 mm. Wyróżniają oni cztery struktury przepływu: pęcherzykową B, rzutową S, pianową F i pierścieniową A (*Rys. 2.5a*). Natomiast Akbar i inni [1] zaproponowali mapę uniwersalną w oparciu o analizę czterech map innych badaczy (3 dla przepływu poziomego i 1 dla przepływu pionowego), sugerując brak wpływu kierunku przepływu na powstające struktury (*Rys. 2.5b*). Autorzy stwierdzają, że opracowana przez nich mapa w zadowalający sposób opisuje dane doświadczalne powyżej $D_h > 1$ mm dla minikanalów o przekroju okrągłym, jednocześnie podając jako zalecany obszar przyszłych badań, dokładniejsze określenie granicy tworzenia się struktury pianowej F. W oparciu o siły panujące podczas przepływu w minikanalach wyróżnili oni trzy podstawowe zakresy przepływu:

- zdominowany siłami napięcia powierzchniowego (struktura pęcherzykowa B i rzutowa S),
- przejściowy (struktura przejściowa I i pianowa F),
- zdominowany siłami bezwładności (struktura pierścieniowa A).



Rys. 2.5. Wyniki określenia uniwersalnej mapy przepływu w minikanalach przez:
 a) Hassana i innych [27],[28], b) Akbara i innych [1]

Należy w tym miejscu podkreślić, że powyższe rozważania (jak zauważają sami ich autorzy) wymagają dodatkowych badań, dlatego zagadnienie map przepływu dwufazowego wymaga dalszych prac badawczych. Natomiast Shao i inni [70] na podstawie dostępnych badań stwierdzają, że mapy oparte na najprostszych współrzędnych (w_{sl} i w_{sg}), przedstawiają najlepiej przejścia pomiędzy różnymi strukturami przepływu.

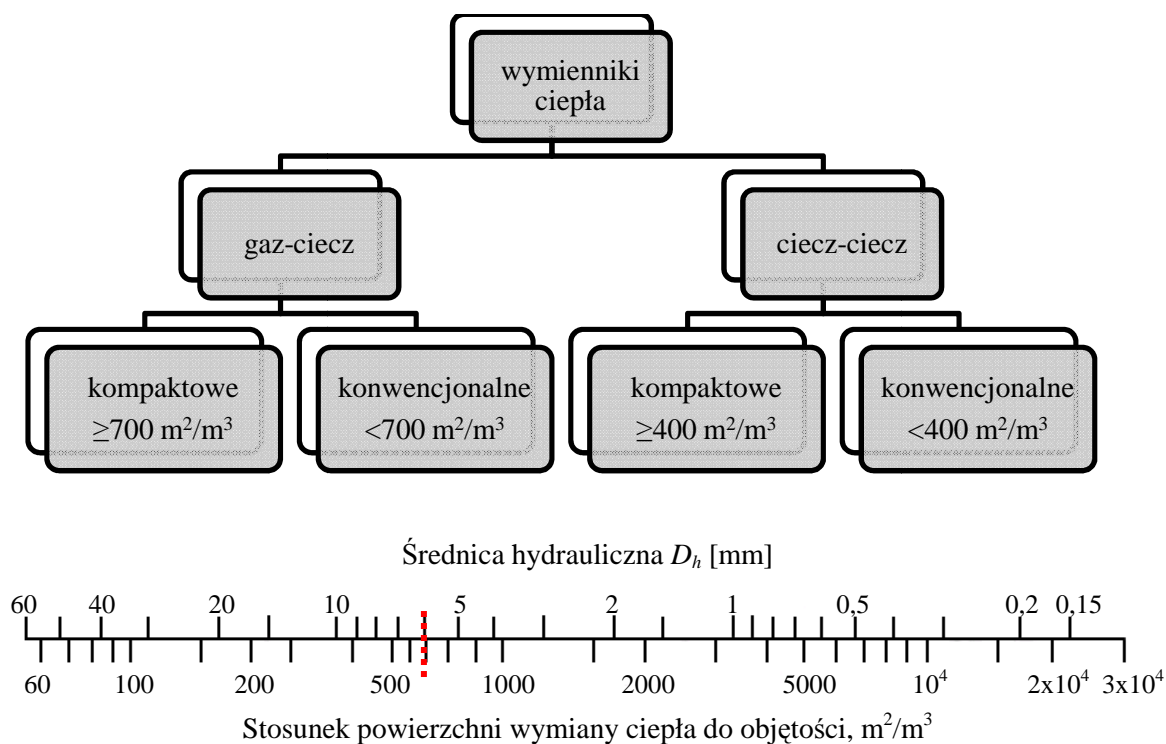
3. Przegląd literaturowy w zakresie przepływu mieszaniny dwufazowej w minikanalach

3.1. Zastosowanie minikanalów w procesach technologicznych

Miniaturyzacja jest hasłem, które obowiązuje zarówno w sferze wysoko rozwiniętej technologii, jak również w tradycyjnych sektorach przemysłu. Miniaturowe elementy spotyka się w takich sektorach przemysłu, jak: elektronika, farmacja, medycyna oraz w sektorze wojskowym [11]. Bardzo dynamicznie rozwijającym się działem przemysłu energetycznego są obecnie przedsiębiorstwa produkujące wymienniki ciepła wraz z oprzyrządowaniem, zwłaszcza w mini- i mikroskali. Dotyczy to w głównej mierze kompaktowych wymienników ciepła, mikro- i mini pomp oraz układów do precyzyjnego dozowania substancji chemicznych. Wiele światowych koncernów i współpracujące z nimi instytuty badawcze zwracają uwagę na produkcję elementów odprowadzających ciepło ze źródeł punktowych, charakteryzujących się gęstością strumienia ciepła, przekraczającą dotychczasowe, konwencjonalne zakresy. Istotnym polem zainteresowania jest konieczność odprowadzania coraz większych strumieni ciepła, generowanych w układach elektronicznych o bardzo dużej mocy [16].

Wdrażanie filozofii ekoprojektowania produktu polegającej na tym, że zmniejszenie szkodliwego oddziaływania produktu na środowisko bierze się pod uwagę nie tylko w fazie jego projektowania, ale dotyczy całego cyklu życia produktu [44]. Dlatego dominującą rolę w ekoprojektowaniu maszyn i urządzeń energetycznych odgrywają dwa aspekty, tzn. racjonalne wykorzystanie energii i ochrona środowiska, co powoduje, że współczesne tendencje rozwoju tego typu układów zmierzają w kierunku miniaturyzacji, którą należy rozumieć jako trend dotyczący zmniejszania rozmiarów układu, z zachowaniem niezmienności jego funkcjonalności użytkowej [24]. Ponadto, przewiduje się, że do 2015 roku ilość produktów, która powstanie w wyniku zastosowania mini-, mikro- i nanotechnologii osiągnie poziom 15% wszystkich wytwarzanych produktów [29]. Intensywność wymiany ciepła ma duże znaczenie w działaniu wymienników ciepła, zwłaszcza zaś w urządzeniach przemysłowych. Jej zwiększenie pozwala bowiem zmniejszyć wymiary i ciężar projektowanych wymienników lub poprawić pracę już istniejących, co jest zgodne z ideą miniaturyzacji. Zmniejszanie wymiarów wymienników ciepła, wykorzystujących procesy z przemianą fazową (parowniki, skraplacze) stwarza konieczność stosowania mini- oraz mikrokanalów, co powoduje wzrost zainteresowania

kompaktowymi wymiennikami ciepła w ostatnich latach, a także konieczność dokładanego poznania procesów zachodzących podczas przepływów w minikanalach. Pojęcie kompaktowego wymiennika ciepła, jak już wspomniano wcześniej, zdefiniował Shah [68] – jest to wymiennik którego wskaźnik zwartości konstrukcji wynosi ponad $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (Rys. 3.1).

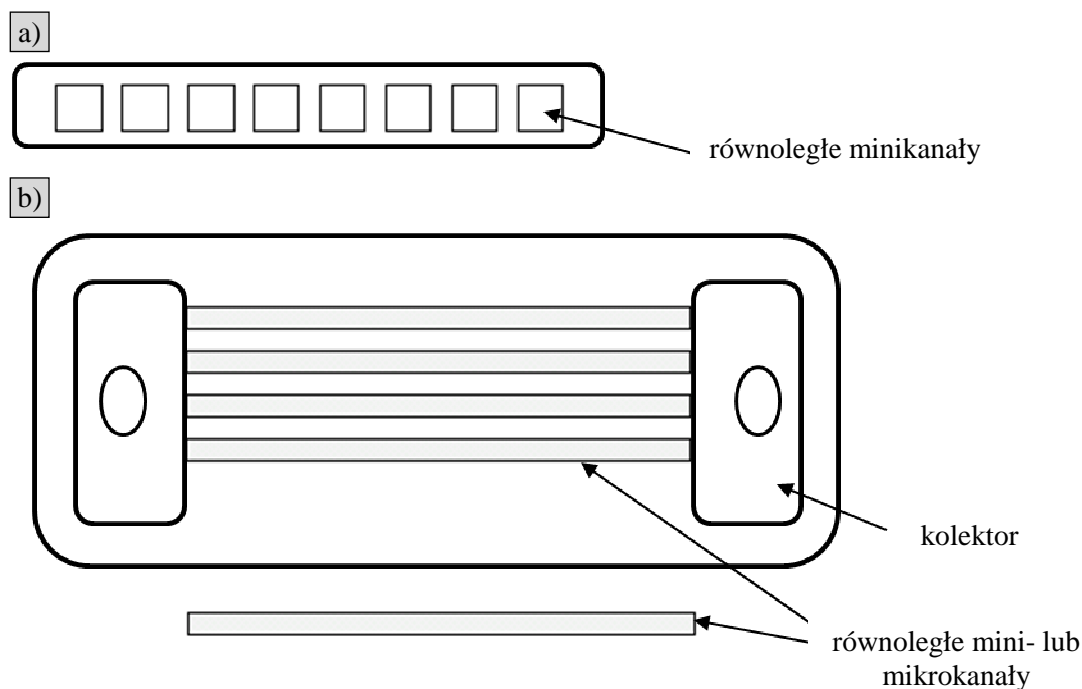


Rys. 3.1. Klasyfikacja wymienników ciepła ze względu na zwartość konstrukcji wg Shaha [69]

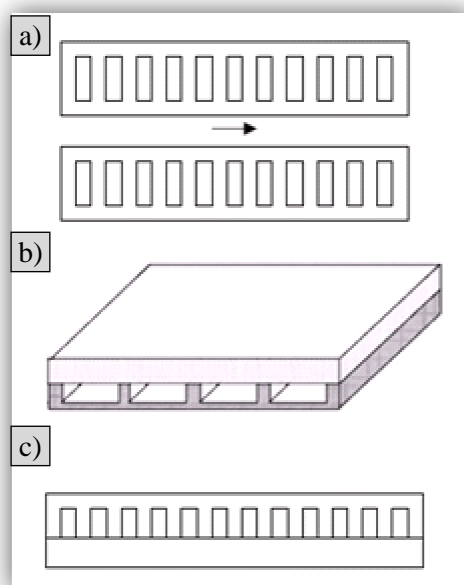
Zgodnie z powyższym, w kompaktowych wymiennikach ciepła wymaga się zastosowania kanałów o średnicy hydraulicznej od 1 do 6 mm, które, zgodnie z przyjętą w pracy klasyfikacją, nazywa się minikanalami.

Poniżej przedstawiono przykładowe aparaty przemysłowe zbudowane z minikanalów, w których realizowany jest przepływ dwufazowy.

Na rysunku (Rys. 3.2) przedstawiono przykład kompaktowego parowacza zbudowanego z minikanalów o kwadratowym przekroju poprzecznym, przez które odbywa się przepływ czynnika [31].



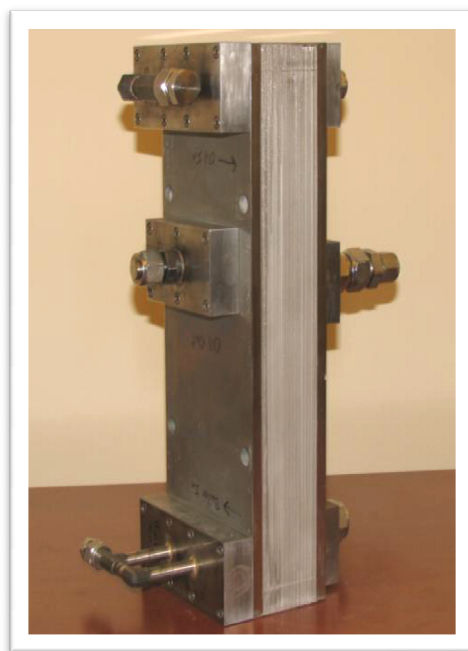
Rys. 3.2. Przykład kompaktowego parowacza: a) przekrój poprzeczny, b) schemat kompaktowego parowacza z mini- i mikrokanalami współpracującymi równoległe [31]



Rys. 3.3. Schemat układów minikanalów występujących w systemach chłodzenia układów elektroniki w: (a) krzyżowym wymienniku ciepła wg Harrisa i innych [26], b) radiatorze wg Kim i Kim [37], c) w radiatorze wg Kawano i innych [35]

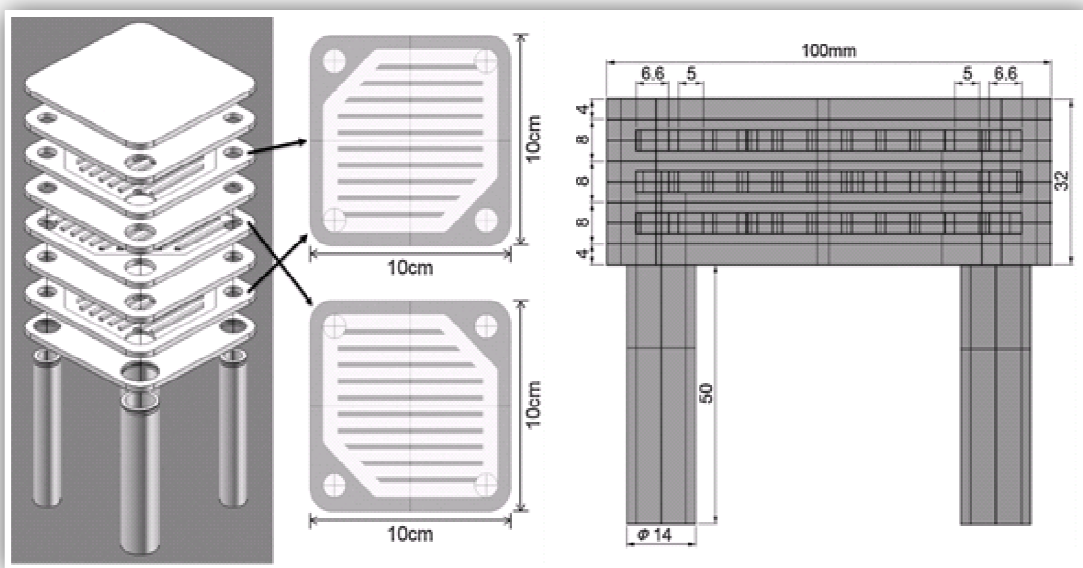
Warto zwrócić uwagę, że przedstawione na Rys. 3.3 trzy rodzaje konfiguracji minikanalów w urządzeniach używanych do chłodzenia układów w przemyśle motoryzacyjnym, wykorzystują ten sam prostokątny przekrój poprzeczny poszczególnych minikanalów. Inny przykład wymiennika ciepła służącego jako parowacz przedstawiono na Rys. 3.4.

Wymiary zewnętrzne tego urządzenia to 66×133×375mm (grubość/szerokość/wysokość) oraz o $D_h=0,58$ mm pojedynczego mikrokanalu.



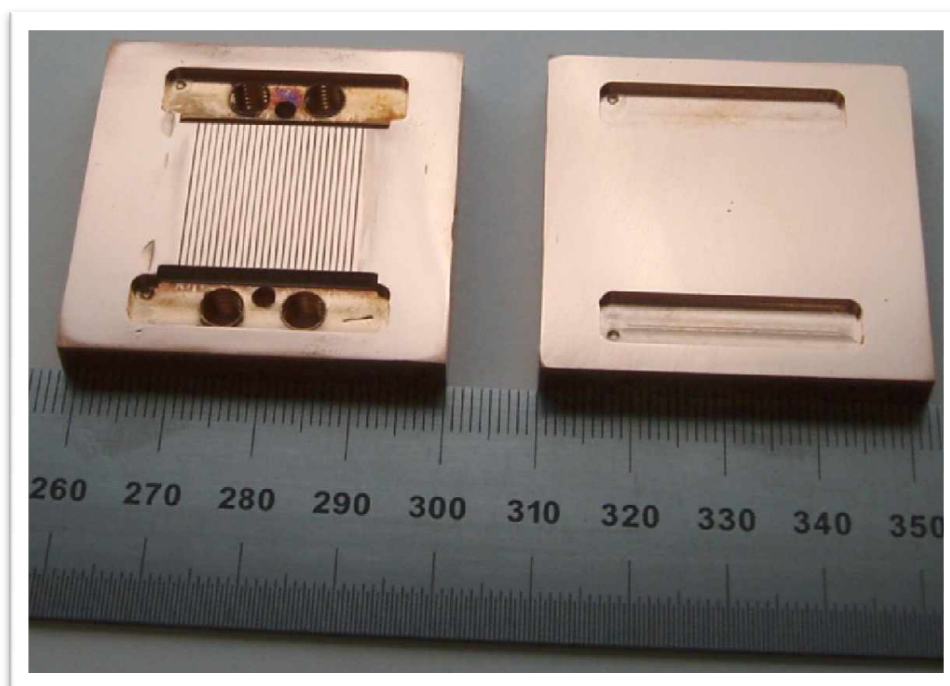
Rys. 3.4. Parowacz zbudowany z minikanalów [87]

Kolejnym przykładem kompaktowego wymiennika ciepła jest wykorzystany w badaniach Takeuchi'ego i innych [77], który to może być stosowany jako pośredni wymiennik ciepła pracujący w wysokich temperaturach w reaktorze syntezy jądrowej (Rys. 3.5). Poniżej został przedstawiony przekrój tego wymiennika. Każda warstwa ma 12 kanałów przepływowych o przekroju 5×4 mm i długości około 75 mm o $D_h=4,44$ mm.



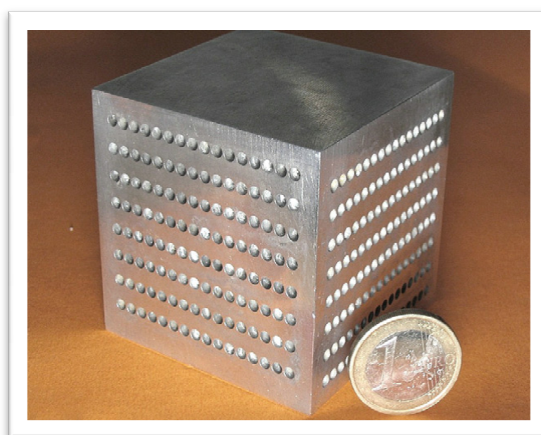
Rys. 3.5. Przekrój modułu eksperymentalnego wymiennika ciepła wykorzystanego w badaniach Takeuchi'ego i innych [77]

Jednym z przykładów aplikacji urządzeń zbudowanych z minikanalów są wspomniane wcześniej radiatory, na fotografii poniżej (Rys. 3.6) przedstawiono przykładowy model tego urządzenia.

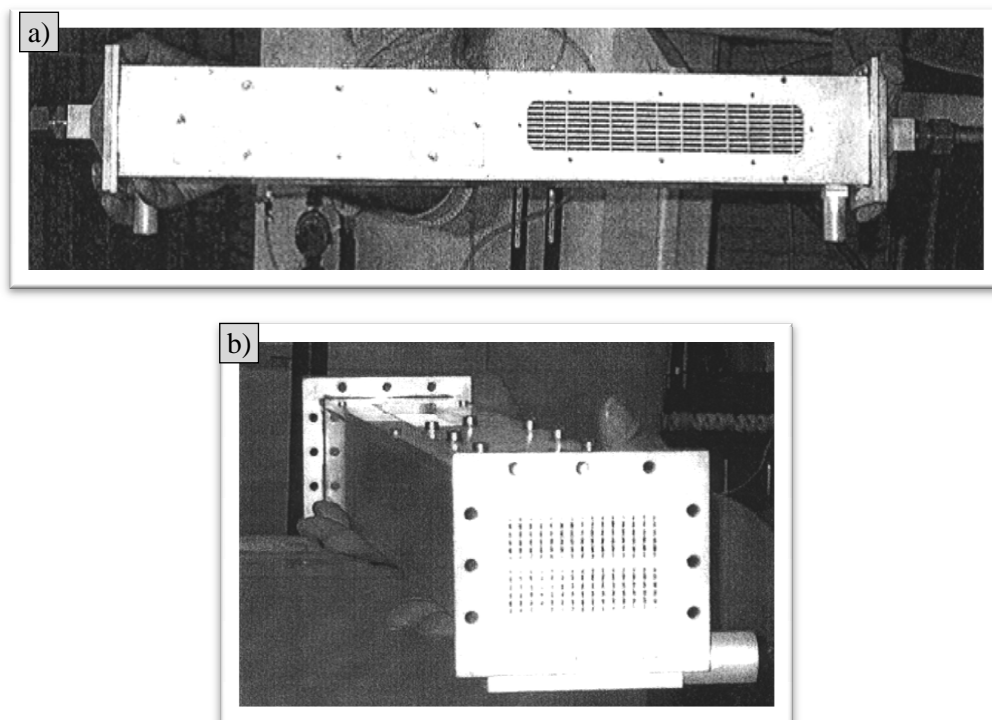


Rys. 3.6. Przykład minikanalowego radiatora [43]

Z kolei na fotografiach poniżej przedstawiono dwa przykłady miniwymienników wykonanych z aluminium (Rys. 3.7 i Rys. 3.8). Pierwszym z nich jest sześcienny wymiennik ciepła, o krawędzi długości 56,5 mm. Łączna ilość minikanalów o przekroju kołowym w tym wymienniku wynosi 128, każdy o średnicy 2,5 mm. Natomiast drugi miniwymiennik składa się z minikanalów o przekroju prostokątnym i średnicy hydraulicznej równej 1,35 i 1,45 mm, o długości 651 mm każdy.



Rys. 3.7. Fotografia przedstawiająca sześcienny miniwymiennik z aluminium [46]



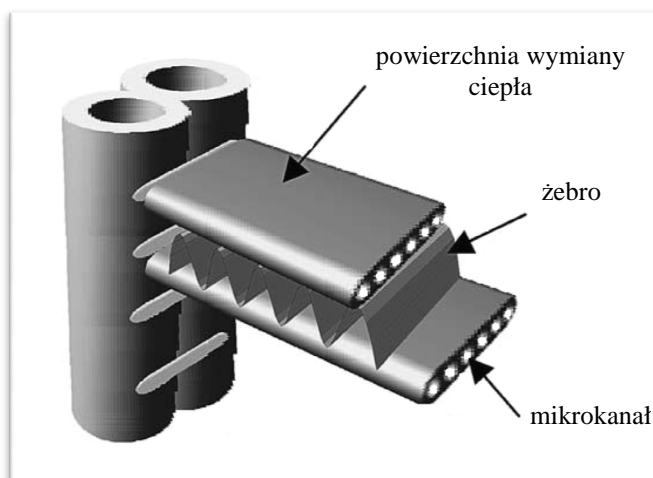
Rys. 3.8. Wykonany z aluminium miniwymiennik ciepła a) widok z góry, b) widok z boku [61]

Poniżej na fotografii (Rys. 3.9) przedstawiono urządzenie, którego maksymalna moc wynosi 20 kW. Jest to mikrowymiennik ciepła, który zastosowano jako element instalacji do produkcji biodiesla.



Rys. 3.9. Przykład mikrowymiennika stosowanego do produkcji biodiesla [7]

Wymiennik ciepła o jeszcze mniejszych gabarytach przedstawiono na kolejnym rysunku (Rys. 3.10), składa się on z mikrokanałów o przekroju kołowym i średnicy równej 0,81mm.



Rys. 3.10. Schemat mikrowymiennika ciepła używanego w systemach klimatyzacji [59]

Z najnowszych dziedzin warto wymienić specyficzne zagadnienia przepływów dwufazowych w warunkach nieważkości w mini-, mikro-, i nanokanalach związane z rozwojem nanotechnologii. Ich przykładem mogą być badania prowadzone na orbicie okołozemskiej (program NASA-Space Shuttle) oraz na pokładach specjalnych samolotów umożliwiających osiągnięcie warunków nieważkości [99].

Podsumowując, przedstawiony przegląd urządzeń zbudowanych z mini i mikrokanalów, można zauważyć, iż możliwość ich aplikacji jest szeroka. Warto również zauważyć, że zdecydowanie częściej w najnowszych rozwiązaniach w kompaktowych wymiennikach ciepła występują przewody o przekroju prostokątnym i kwadratowym. Dzięki temu uzyskuje się większą zwartość aparatury, większą powierzchnię ścian minikanalów, a tym samym większą powierzchnię wymiany ciepła w stosunku do układów zbudowanych z pęku rur. Dlatego przewody o przekroju niekołowym zwykle prostokątnym lub kwadratowym są odpowiedzią na szeroko rozumianą miniaturyzację (zmniejszania rozmiarów układu, z zachowaniem niezmienności jego funkcjonalności użytkowej).

3.2. Badania wpływu średnicy minikanалу na hydrodynamikę przepływu

W literaturze przedmiotu podejmowano już próbę określenia wpływu średnicy minikanalu na hydrodynamikę przepływu, skupiając się głównie na aspekcie powstających podczas przepływu struktur. Zdecydowana większość tych badań dotyczyła jednak przepływów w poziomych mini- i mikrokanalach jak np. badania: Colemana i Garimelli [14], Tripletta i innych [79], Chena i innych [10], Hassana i innych [27], Yue i innych [96], Saisorna i Wongwisesa [67].

W odniesieniu do tych badań do tej pory nie ma jednoznacznej interpretacji wpływu średnicy na zakres występowania poszczególnych struktur przepływu [64]. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku przepływów dwufazowych w minikanalach pionowych. Lin i inni [45] badali struktury przepływu dla powietrza i wody w rurach o średnicy od 0,5-4,0 mm w następujących warunkach: $t=20^{\circ}\text{C}$ i $p=1$ bar. Zaobserwowali, że granica przejścia pomiędzy przepływem rzutowym a pianowym, a także pianowym a pierścieniowym przesuwa się w kierunku obszaru niższych prędkości pozornych gazu wraz ze zmniejszeniem średnicy minikanalu. Jednak przeciwne wnioski przedstawili w swojej pracy Zhao i Bi [100]. Dokonali oni eksperymentalnych badań charakterystyki struktur przepływu dla współprądowego wznoszącego przepływu dwufazowego gaz-ciecz w minikanalach pionowych o przekroju poprzecznym trójkąta równobocznego o średnicach hydraulicznych równych kolejno: 2,886, 1,443 i 0,866 mm. Badania Zhao i Bi [100] wykazały, że zakres występowania przepływu pęcherzykowo-dyspersyjnego przesuwa się w kierunku wyższych prędkości pozornych cieczy, podczas gdy zakres występowania przepływu pianowego i pierścieniowego umiejscawia się na wyższych prędkościach pozornych gazu wraz ze zmniejszaniem rozmiaru minikanalu. Te wyniki są całkowicie sprzeczne z wynikami przedstawionymi przez Lina i innych [45]. Z kolei badania przeprowadzone przez Chena i innych [9] wykazują następującą zależność: im mniejsza średnica przewodu, tym bardziej – po pierwsze – granica przejścia struktury rzutowej w pianową, a także pianowej w pierścieniową, przesuwa się w kierunku wyższych prędkości pozornych fazy gazowej oraz – po drugie – granica przejścia pomiędzy strukturą pęcherzykową i pęcherzykowo-dyspersyjną przesuwa się w kierunku wyższych prędkości pozornych cieczy. Opisane powyżej wyniki badań poszczególnych autorów zostały podsumowane w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Kierunek przesunięcia granicy struktury przepływu wraz ze zmniejszeniem średnicy hydraulicznej przewodu

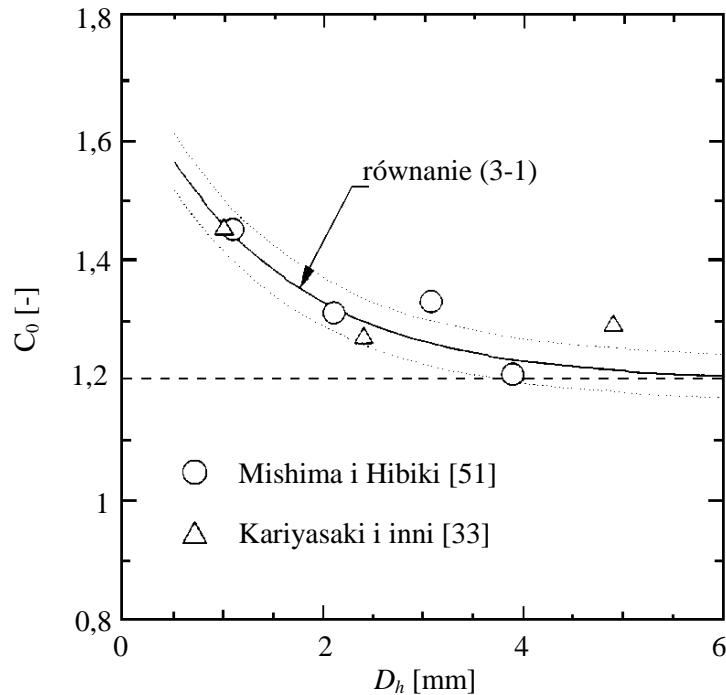
Autorzy	D_h [mm]	czynnik	Granice przejścia struktur przepływu		
			B→DB	S→F	→A
Lin i inni [45]	0,5-4	woda-powietrze	–	niższa w_{sg}	niższa w_{sg}
Zhao i Bi [100]	0,866; 1,443; 2,886	woda-powietrze	wyższa w_{sl}	wyższa w_{sg}	wyższa w_{sg}
Chen i inni [9]	1,10; 2,01; 2,88; 4,26	powietrze-R134a	wyższa w_{sl}	wyższa w_{sg}	wyższa w_{sg}

Jakkolwiek nie ma jednoznacznie określonego wpływu średnicy minikanалу na zakres powstawania struktur przepływu, to przedstawione powyżej badania zakładają, że on istnieje. W tym miejscu warto jednak wspomnieć już przedstawione wcześniej mapy uniwersalne zaproponowane dla minikanalów (dla przewodów o różnych wartościach średnicy hydraulicznej) autorstwa Hasana i innych [28] oraz Akbara i innych [1] (Rys. 2.5). Ta niejednoznaczność w literaturze przedmiotu sprawia, że określenie wpływu średnicy minikanalu na zakresy występowania struktur przepływu wydaje się być wciąż tematem otwartym.

Innym ważnym aspektem oceny wpływu średnicy przewodu na hydrodynamikę przepływu jest określenie udziałów objętościowych faz. Tym tematem w swoich badaniach zajmowali się Mishima i Hibiki [51], którzy na podstawie analizy danych doświadczalnych dla pionowych przewodów okrągłych o średnicy od 1 do 4 mm oraz następujących zakresów prędkości pozornych: $w_{sg}= 0,1-50$ m/s i $w_{sl}= 0,02-2$ m/s wnoszą, że prędkość poślizgu w_{dr} przyjmuje wartości bliskie zero. Autorzy ci stwierdza również, że parametr rozkładu - stała C_0 w modelu Zubera-Findlaya [102] dla przepływu dwufazowego w minikanalach silnie zależy od średnicy i zaproponowali następującą zależność:

$$C_0 = 1,2 + 0,510 * e^{(-0,691 * D_h^*)} \quad (3-1)$$

* gdzie D_h jest w mm.



Rys. 3.11. Określenie parametru dystrybucji C_0 wg [51]

Inny zespół badaczy, mianowicie Chen i inni [10], po przeprowadzeniu badań w poziomych przewodach okrągłych o średnicy 1,0 i 1,5 mm także dokonali modyfikacji modelu Zuber–Findlaya [102], proponując następującą zależność na rzeczywistą prędkość struktur gazowych:

$$w_g = 0,932 w_T^{1,11} \quad (3-2)$$

gdzie w_T to prędkość pozorna mieszaniny dwufazowej.

Zależność została zaproponowana do obliczania prędkości gazu dla struktury pęcherzykowej, rzutowej i pianowej. Z formuły tej wynika, że wyklucza się jakkolwiek wpływ średnicy przewodu na hydrodynamikę przepływu mieszaniny dwufazowej.

4. Podsumowanie

Przeprowadzona ocena stanu wiedzy dotyczącej hydrodynamiki przepływu dwufazowego w minikanalach pozwala stwierdzić istotne rozbieżności w dotychczasowych wynikach badań. W literaturze brak jest jednoznacznych informacji odnośnie: określenia granicy pomiędzy minikanalami a kanałami konwencjonalnymi, nazewnictwa powstających struktur przepływu a także zakresów ich występowania. Również prace autorów analizujących wpływ średnicy przewodu na reżimy przepływu nie pozwalają na jednoznaczną odpowiedź. Przedstawiony przegląd literaturowy dotyczący hydrodynamiki przepływu gaz-ciecz w minikanalach pozwala stwierdzić, że mimo opublikowanych wielu prac badawczych, zagadnienie określenia wpływu średnicy minikanalu na hydrodynamikę przepływu jest wciąż na wstępnym etapie badań. Dlatego wydaje się być celowym podjęcie dalszych badań w tym obszarze.

5. Cel i zakres pracy

Na podstawie studiów literaturowych, dotyczących przepływu mieszaniny dwufazowej gaz-ciecz w minikanalach zaobserwowano, że mimo podjętych wcześniej badań dotyczących wpływu wielkości parametrów geometrycznych (średnicy hydraulicznej minikanalu) na hydrodynamikę przepływu, nie ma jednoznacznej odpowiedzi na to pytanie. Wynikiem dynamicznie rozwijających się wielu obszarów zastosowań jest miniaturyzacja elementów przenoszących bardzo dużą gęstość strumienia ciepła, którymi są kompaktowe wymienniki ciepła. To aparaty szeroko stosowane w przemyśle których w integralną część stanowią minikanaly. Dlatego dokładne poznanie hydrodynamiki przepływu mieszaniny gaz-ciecz w minikanalach (w zależności od średnicy hydraulicznej), jest tak istotnym elementem.

Na tej podstawie za cel pracy przyjęto eksperymentalne określenie wpływu średnicy hydraulicznej minikanalu na hydrodynamikę przepływu gaz-ciecz dla potrzeb projektowania i określenia warunków pracy aparatów z minikanalami.

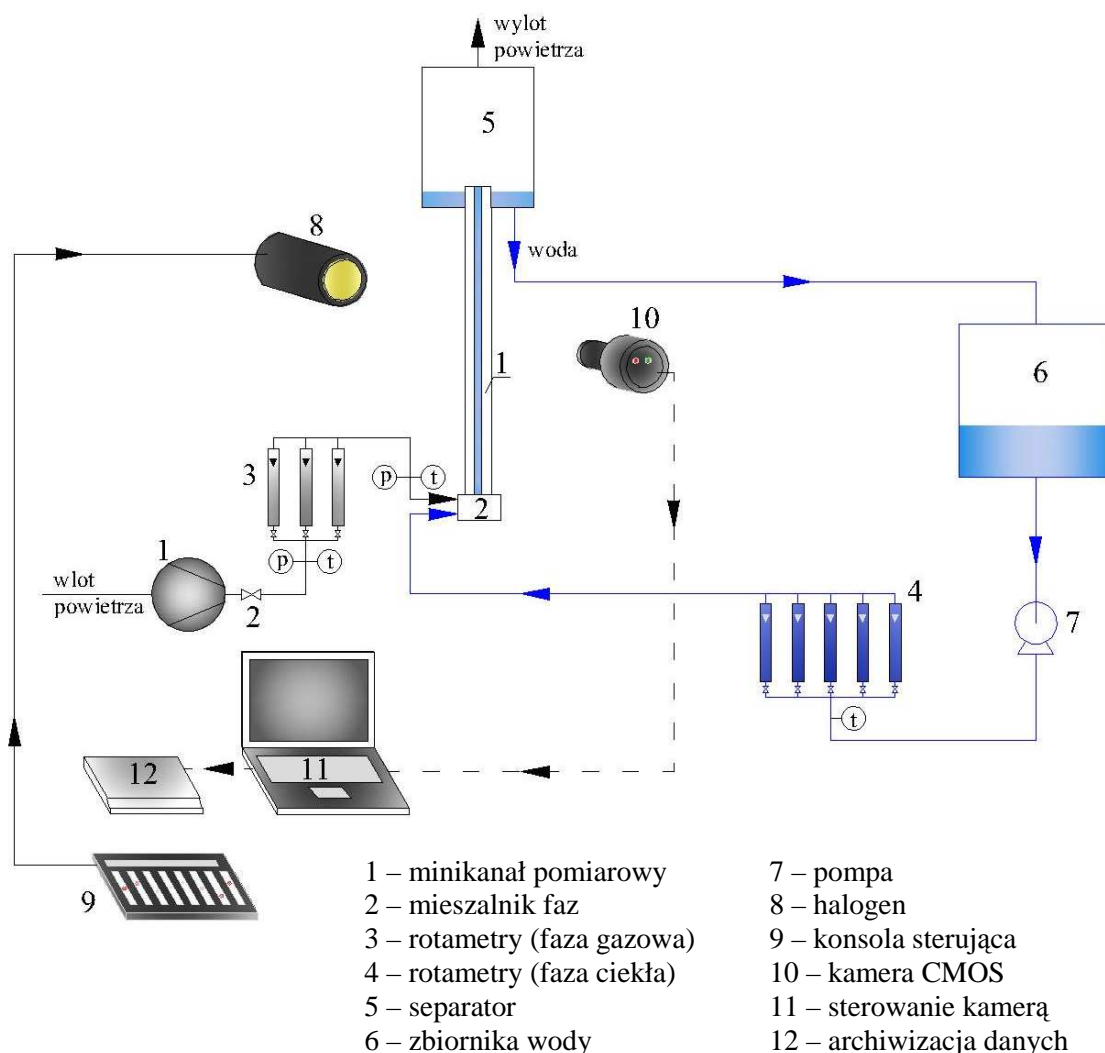
Zakres pracy obejmował:

- przegląd literaturowy,
- projekt oraz budowę stanowiska badawczego,
- wizualizację procesu przepływu dwufazowego w minikanalach pionowych,
- cyfrową obróbkę obrazu pod kątem fluktuacji poziomu szarości,
- identyfikację powstających struktur przepływu oraz opracowanie map przepływu,
- analizę porównawczą badań własnych z istniejącymi wynikami,
- wykorzystanie technik korelacyjnych, do wyznaczenia prędkości struktur gazowych w minikanalach,
- wyznaczanie parametrów w modelu poślizgu dla minikanalów,
- określenie udziału objętościowego fazy gazowej.

6. Stanowisko pomiarowe

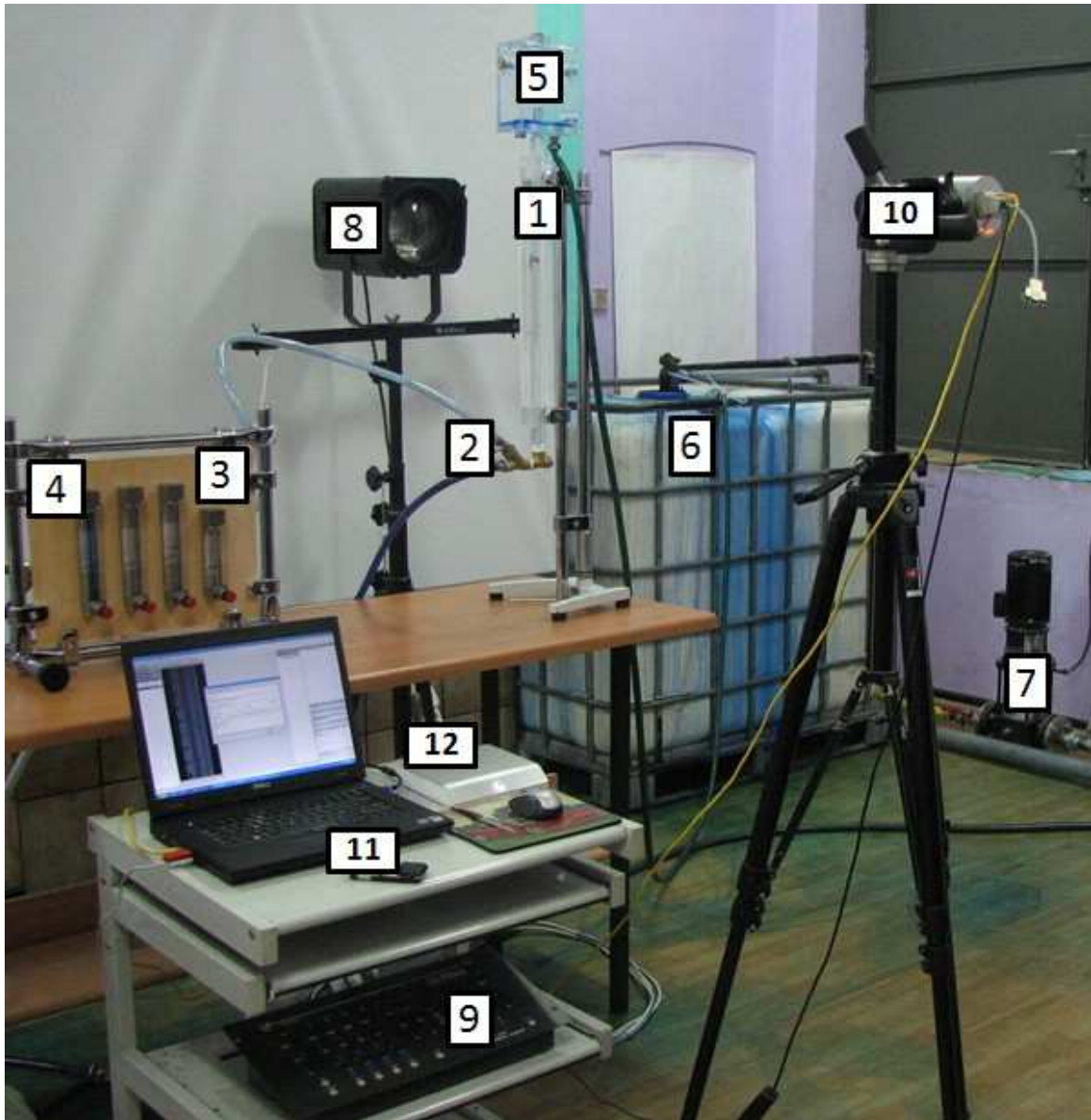
W celu eksperymentalnego określenia wpływu średnicy hydraulicznej minikanalu dla przepływu wznoszącego mieszaniny dwufazowej gaz-ciecz zaprojektowano i zbudowano stanowisko pomiarowe (*Rys. 6.1* i *Rys. 6.2*), na którym założono możliwość obserwacji jak i rejestracji obrazu wytworzonej mieszaniny dwufazowej w płaszczyźnie pionowej. Było to możliwe dzięki zastosowaniu metody wizualizacyjnej opartej na cyfrowym przetwarzaniu obrazu, która jest skutecznym i zaawansowanym narzędziem, mogącym znaleźć szerokie zastosowanie przy ocenie hydrodynamiki przepływu mieszaniny dwufazowej w aparatach o skomplikowanej geometrii. Dzięki jej użyciu i komputerowej analizie wyników, można oceniać z dużą dokładnością struktury przepływu oraz scharakteryzować przepływ w minikanale bez jakiegokolwiek fizycznej ingerencji. Głównym elementem instalacji był usytuowany pionowo kanał pomiarowy o kształcie prostopadłościanu i wymiarach zewnętrznych 21×21×600 mm (grubość/szerokość /wysokość). Za pomocą pięciu wymiennych elementów, o wymiarach wewnętrznych minikanalów przedstawionych na *Rys. 6.3* i *tabeli 6.1*, przyjęte rozwiązanie stanowiska umożliwiała zmianę poszczególnych minikanalów i przeprowadzenie badań dla każdego przekroju poprzecznego z osobna. Instalacja do badań eksperymentalnych posiadała dwa obiegi: wodny oraz powietrzny. Obieg powietrzny był otwarty, powietrze tłoczone było z sieci sprężonego powietrza poprzez baterię rotametrów 3. Z kolei obieg wodny jest obiegiem zamkniętym: woda tłoczona była pompą 7, ze zbiornika 6, poprzez baterię rotametrów 4, do mieszalnika faz 2. W mieszalniku 2 miało miejsce łączenie strumieni obu faz i wprowadzenie wytworzonej mieszaniny gazowo-cieczowej do minikanalu pomiarowego. W separatorze 5, umieszczonym na wylocie kanału następowało rozdzielanie faz, powietrze uchodziło do atmosfery, a ciecz zawracana była do zbiornika 6. Stanowisko pomiarowe umiejscowione było w laboratorium do cyfrowej analizy obrazu. Sterowanie procesem odbywało się poprzez regulację strumieni fazy gazowej jak i fazy ciekłej oddzielnie dla każdego przekroju minikanalu. Wszystkie parametry fizykochemiczne gazu, jak i cieczy podczas doświadczenia praktycznie nie ulegały zmianie. Badania nad hydrodynamiką przepływu dwufazowego oparte były na cyfrowej analizie obrazu dlatego woda krążąca w obiegu zamkniętym została zabarwiona, aby uzyskać kontrast pomiędzy naturalnie bezbarwnymi czynnikami. W tym celu posłużono się barwnikiem nieinwazyjnym fizykochemicznie, a mianowicie błękitem metylowym ($C_{16}H_{18}ClN_3S$). Ponieważ jego koncentracja była bardzo niska gęstość, lepkość i napięcie powierzchniowe

fazy ciekłej, nie ulegały zmianie. Podczas realizacji pomiarów temperatura otoczenia wynosiła $t=22^{\circ}\text{C}$ a ciśnienie na wlocie do minikanalu wynosiło $p=1,03\text{ bar}$.



Rys. 6.1. Schemat instalacji do badania przepływu gaz-ciecz w minikanalach

Ponieważ dla przepływu w minikanalach często stosuje się przewody o prostokątnym a szczególnie kwadratowym przekroju poprzecznym, ze względu na większą powierzchnię wymiany ciepła w stosunku do kanałów o przekroju okrągłym [82], a także możliwość większego upakowania i zwartości aparatu [19], w pracy dobrano przekrój minikanalów o profilu kwadratowym. Dodatkowo wybór takiego przekroju potwierdzają prace [14],[92], w których autorzy przedstawiają w swoich badaniach znikomy wpływ kształtu minikanalu na granice przejścia pomiędzy strukturami przepływu. Co więcej dzięki doborowi takiego przekroju istniała możliwość realizacji najlepszej jakości badań wizualizacyjnych [47].



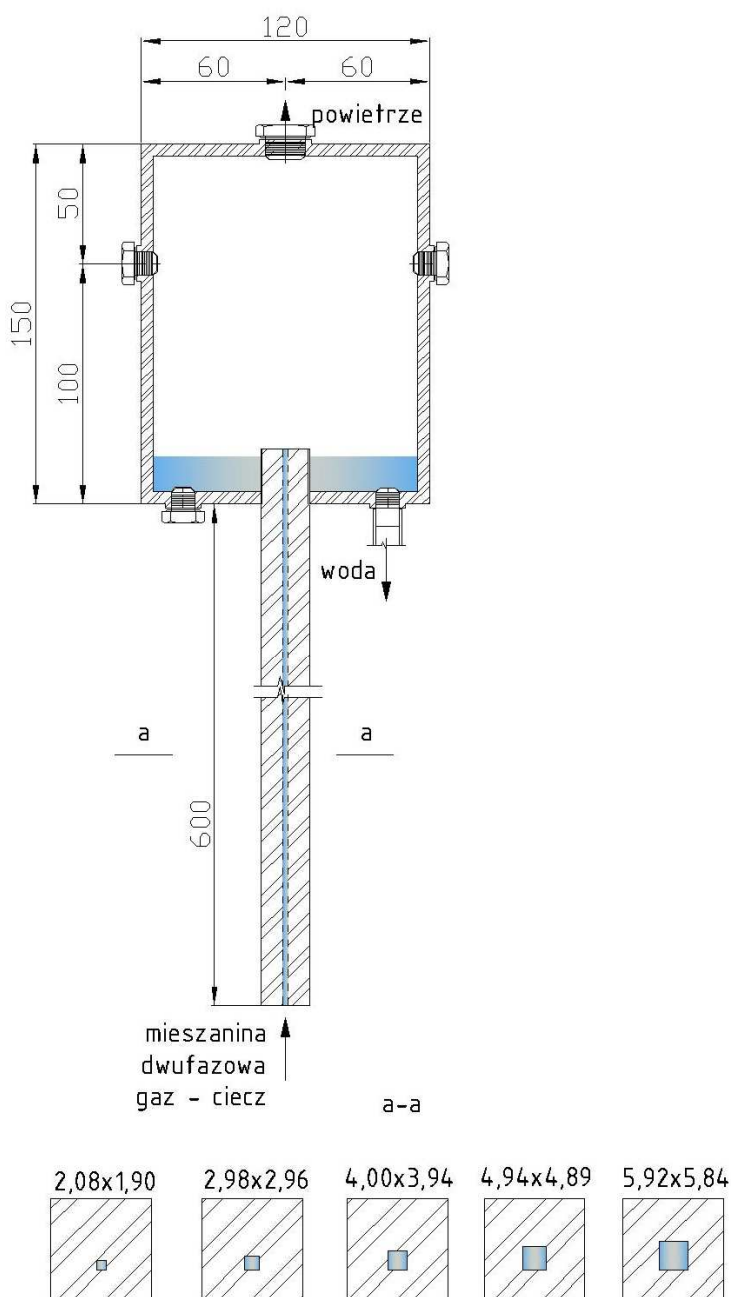
Rys. 6.2. Wygląd rzeczywisty stanowiska pomiarowego: 1 – badany minikanał, 2 – mieszalnik faz, 3 – rotametry (faza gazowa), 4 – rotametry (faza ciepla), 5 – separator, 6 – zbiornik wody, 7 – pompa, 8 – halogen, 9 – konsola sterująca, 10 – kamera CMOS, 11 – sterowanie kamerą, 12 – archiwizacja danych

Wymienne elementy 1, stanowiska pomiarowego zostały wykonane ze szkła organicznego – dobór takiego materiału konstrukcyjnego zapewnił dostateczną przezroczystość w płaszczyźnie obrazowania.

Geometria separatora faz, elementu 1, a także każdego minikanalu pomiarowego została przedstawiona na Rys. 6.3. Rzeczywiste wartości średnice hydraulicznych tych minikanalów zostały przedstawione w tabeli 6.1. Dla uproszczenia nazewnictwa w dalszej części pracy przewody pomiarowe opisuje się odpowiednio jako minikanaly o średnicy hydraulicznej: 2, 3, 4, 5 i 6 mm. We wszystkich przeprowadzonych obliczeniach w toku badań własnych posługiwano się rzeczywistymi wymiarami minikanalów.

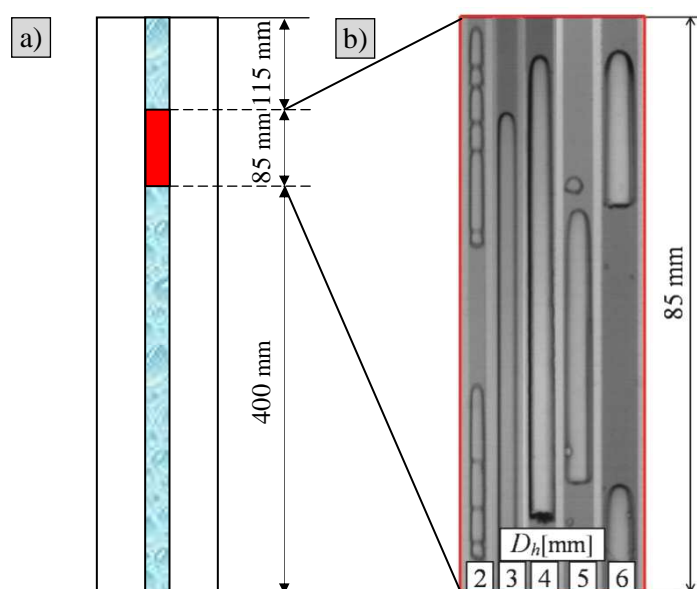
Tabela 6.1. Wartości średnic hydraulicznych minikanalów

Wymiary rzeczywiste [mm]		Wartość rzeczywista	Wartość przyjęta
a	b	D_h [mm]	
2,08	1,90	1,99	2
2,98	2,96	2,97	3
4,00	3,94	3,97	4
4,94	4,89	4,88	5
5,92	5,84	5,88	6



Rys. 6.3. Geometria minikanalów pomiarowych

Zjawiska zachodzące w minikanalach, rejestrowano przy użyciu szybkiej kamery cyfrowej HCC-1000 firmy VDS Vosskühler, o częstotliwości do 1800 Hz, sprzężonej z przenośnym komputerem pełniącym rolę sterownika jak również rejestratora. Kamera posiadała specjalny obiektyw makro, dzięki któremu uzyskany obraz, mimo małych rozmiarów przewodu pomiarowego zapewniał odpowiednią ostrość oraz czytelność. Przy rozdzielczości 1024×256 pikseli rejestrowano sekwencje 1000 map bitowych. Częstotliwość z jaką nagrywano sekwencje obrazów wynosiła 264 Hz, co odpowiadało 3,78 sekundy rzeczywistego czasu trwania procesu. Łącznie dla wszystkich pięciu średnic hydraulicznych zarejestrowano 420 sekwencji filmowych. Obrazy te rejestrowano w pamięci wewnętrznej kamery, a następnie całą sekwencję filmową zapisywano i archiwizowano na przenośnym dysku twardym o pojemności 1 TB (Seagate FreeAgent). Każdy pomiar rozpoczynano po odpowiednio długim czasie pracy instalacji (ok. 5-6 minut), w którym przepływ mieszaniny dwufazowej stabilizował się po zmianie strumieni faz. Przy zastosowaniu reflektora halogenowego (o mocy 1000 W) podłączonego do konsoli sterującej, minikanal pomiarowy został oświetlany metodą „jasnego pola”, a jednorodne tło za minikanalem uzyskano umieszczając ekran rozpraszający światło wykonany z mlecznej płyty plexi. Na Rys. 6.4 przedstawiono obszar rejestracji w minikanalach pomiarowych, który został dobrany po wielokrotnej analizie eksperymentalnej na rzeczywistym stanowisku pomiarowym. Dla sprawdzenia powtarzalności wyników badań pomiary wykonywano dwu lub trzykrotnie.



Rys. 6.4. Obszary rejestracji zjawisk zachodzących w minikanalach a) rozmieszczenie na wysokości całego minikanalu (obszar zaznaczony na czerwono), b) przykładowe obszary obserwacji w minikanalach przy stałych prędkościach pozornych faz: $w_{sg}=0,14-0,16$ m/s i $w_{sl}=0,70-0,75$ m/s

6.1. Charakterystyka urządzeń wykorzystywanych podczas badań własnych

W tabelach poniżej (*Tabela 6.2* i *Tabela 6.3*) przedstawiono dokładną charakterystykę i opis urządzeń wykorzystanych do szybkiej akwizycji obrazu.

Tabela 6.2. Układ aktywizacji obrazu wg [3]

Kamera cyfrowa	
<i>Producent</i>	VDS Vosskühler GmbH
<i>Nazwa</i>	HCC 1000
<i>Receptor</i>	Matryca CMOS o przekątnej ½", monochromatyczna
<i>Rozdzielczość obrazu</i>	1024×256, 1024×512, 1024×1024 pikseli
<i>Pamięć</i>	512 MB
<i>Migawka</i>	1-2010 μs
<i>Czas ekspozycji</i>	0,5-551,9 ms
<i>Częstotliwość próbkowania - f_s</i>	0,001-1800 Hz
Obiektyw	
<i>Obiektyw</i>	macro Sigma, F-mount
<i>Ogniskowa</i>	105 mm
<i>f/stop</i>	1:2.8D

Tabela 6.3. Parametry stacji do sterowania kamerą i archiwizacji danych

Komputer sterujący kamerą	
<i>Producent</i>	DELL
<i>Nazwa</i>	DELL Latitude E5500
<i>Procesor</i>	Intel® Core™ 2 Duo P7250 Processor (2.0GHz)
<i>Pamięć RAM</i>	4096 MB DDR2 (800 Mhz)
<i>Pojemność dysku twardego</i>	200 GB (7200 RPM)
<i>Karta graficzna</i>	Intel® Graphics Media Accelerator X4500
<i>Napęd</i>	Fixed 8x DVD+/-RW Slim Slot
<i>Matryca</i>	15,4" WXGA 1280 x 800 Antiglare
Dysk zewnętrzny	
<i>Nazwa</i>	Seagate FreeAgent
<i>Pojemność</i>	1TB
<i>Pamięć</i>	32 Cache
<i>Prędkość obrotowa</i>	7200

W kolejnych tabelach (*Tabela 6.4* i *Tabela 6.5*) przedstawiono charakterystykę oraz dokładność rotametrów wykorzystywanych podczas badań.

Tabela 6.4. Charakterystyka rotametrów regulujących strumień powietrza

Typ	C2100	C2150	C2150	ROS-10	ROS-16
Model	C110/0001	C210/00025	C211/0010		
Skala rotametrów [dm ³ /h]	1-15	8-80	30-300	110-1100	500-5000
Klasa dokładności	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5
Niepewność pomiarowa bezwzględna [dm ³ /h]	0,525	2,4	9,0	27,5	125

Tabela 6.5. Charakterystyka rotametrów regulujących strumień wody

Typ	RDN-10	RDN-15	RDN-20
Skala rotametrów [dm ³ /h]	3-30	18-180	100-1000
Klasa dokładności	2,5	2,5	2,5
Niepewność pomiarowa bezwzględna [dm ³ /h]	0,75	4,5	25

W celu wyznaczenia dokładności pomiaru w pierwszej kolejności obliczono błąd bezwzględny, który został wyznaczony w oparciu o klasę przyrządu oraz górny zakres pomiarowy. Następnie obliczono przeciętny błąd względny, który określono jako stosunek błędu bezwzględnego do wartości strumieni wyznaczanych w badaniach własnych na skali rotametrów. W przypadku rotametrów regulujących strumień gazu przeciętny błąd względny wyniósł 0,07; natomiast dla rotametrów regulujących strumień cieczy 0,09. Z uwagi na fakt, że stanowisko pomiarowe znajdowało się w laboratorium do cyfrowej analizy obrazu (pomieszczenie bez okien), wyklucza się istnienie czynników zewnętrznych, takich jak zmiany temperatury czy natężenia światła dziennego, które mogłyby wprowadzać błąd przypadkowy.

7. Koncepcja i metodyka badań

Koncepcję badań mieszaniny dwufazowej gaz-ciecz w minikanalach pionowych z wykorzystaniem technik wizualizacyjnych oparto na dwóch podstawowych założeniach:

1. Przestrzenna i czasowa zmiana poziomów szarości zarejestrowanej sekwencji obrazów umożliwia sklasyfikowanie występujących w tym przepływie różnych struktur,
2. Określenie rzeczywistej prędkości przepływu struktur gazowych w różnych obszarach minikanalu, przy zastosowaniu funkcji korelacji wzajemnej umożliwia obliczenie udziału objętościowego gazu.

Do realizacji wyżej przedstawionych założeń wykorzystano następujące oprogramowanie:

- Irfan View 3.91,
- Adobe Photoshop CS,
- MS Paint,
- VirtualDubMod 1.5.10,
- MS Excel,
- Rozpoznawanie Impulsów [41],
- Matlab 7.0 [54], [72].

Program Irfan View 3.91 został użyty jako przeglądarka map bitowych zarejestrowanych zjawisk a także do wstępnej obróbki obrazu której również dokonywano w programach Adobe Photoshop CS i MS Point. Kompresja map bitowych do plików filmowych typu *.avi, była kolejnym etapem przetwarzania uzyskanych wyników badań. Czynności te zrealizowano w programie VirtualDubMod 1.5.10. W celu określenie czasowego i przestrzennego przebiegu zmian poziomu szarości, zastosowano program „Rozpoznawanie Impulsów” opracowany w ramach pracy [41]. W wyniku tego działania uzyskano dane liczbowe z zakresu 0 – 256 (skala poziomów szarości), które następnie poddawano analizie matematycznej w programach MS Excel i Matlab 7.0. Określenie prędkości przepływu struktur rzutowych w minikanalach, realizowana była w środowisku Matlab 7.0. Natomiast pozostałe obliczenia dzięki którym było możliwe rozpoznawanie poszczególnych struktur przepływu oraz wyznaczenie udziału objętościowego faz w minikanalach, były realizowane w środowisku MS Excel. Dla oceny przepływu dwufazowego gaz – ciecz w minikanalach o różnej geometrii przy różnych strumieniach faz, na podstawie analizy

obrazu, ustalono etapy prowadzenia badań oraz opracowano metodykę wykonywanych pomiarów i przekształceń obrazu. Prowadzone badania dotyczyły rejestracji obrazów min. akwizycja obrazu, a następnie cyfrowego przetwarzania i analizy obrazu. Kolejne etapy badań, mierzone wielkości, metodykę badań oraz wyniki końcowe zostały zaprezentowane w tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Etapy badań.

Lp.	ETAP BADAŃ	WIEKOŚCI	METODYKA	WYNIK KOŃCOWY
1.	Wybór parametrów geometrycznych	2,08×1,90 mm 2,98×2,96 mm 4,00×3,94 mm 4,94×4,83 mm 5,92×5,84 mm	Zastosowanie minikanalu o wybranej geometrii	Zakres zmian średnicy hydraulicznej minikanalu
2.	Określenie parametrów przepływowych	Prędkość gazu, Prędkość cieczy	Pomiar gazu – zespół rotametrów Pomiar cieczy – zespół rotametrów	$w_{sg}=(0,13-30,0)$ m/s $w_{sl}=(0,13-1,15)$ m/s
3.	Wizualizacja przepływu	Sekwencja obrazów *.bmp	Rejestracja kamerą CMOS	Zapis cyfrowy, rejestracja sekwencji obrazu o rozdzielczości 1024x256
4.	Obróbka wstępna obrazu	Zmiana sekwencji obrazów *.bmp na plik w formacie *.avi	Montaż filmu	Obraz wyjściowy poddany analizie
5.	Obserwacja wizualna	Identyfikacja struktur przepływu	VirtualDubMod 1.5.10	Opracowanie map przepływu dla minikanalów
6.	Analiza obrazu	Poziom szarości obrazu (obszary badawcze)	Rozpoznawanie impulsów	Czasowe przebiegi zmian poziomów szarości – hydrodynamika przepływu gaz-ciecz w minikanale
7.	Funkcja gęstości prawdopodobieństwa (PDF)	Identyfikacja struktur przepływu	MS Excel	Opracowanie map przepływu dla minikanalów
8.	Funkcja korelacji wzajemnej	Określanie parametrów ruchu struktur przepływu	MATLAB 7.0	Wyznaczenie prędkości fazy gazowej

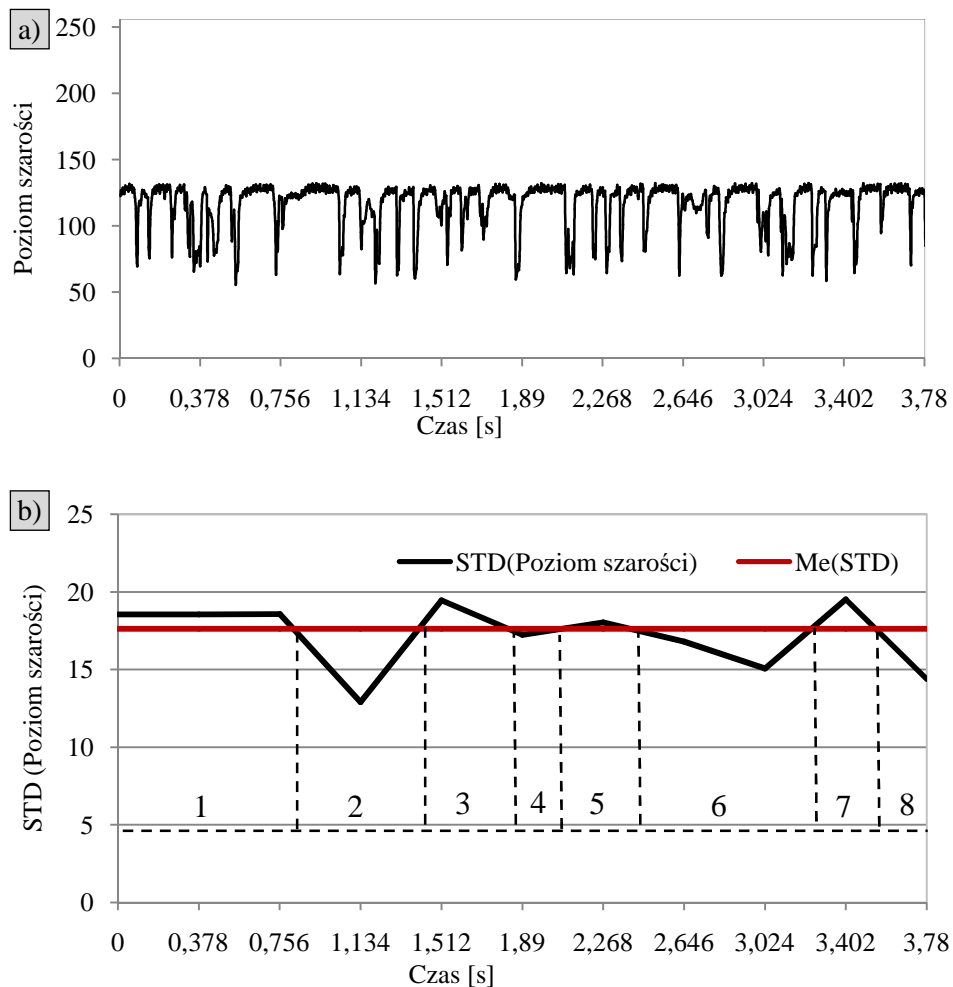
7.1. Test stacjonarności

W analizie przepływu dwufazowego dla zachowania reprezentatywności prób, spełnienie warunków stacjonarności jest podstawowym wymogiem stawianym sygnałom losowym określającym zmiany poziomu szarości. Dlatego aby można było korzystać z metod analizy stochastycznej dla procesów stacjonarnych konieczne było przeprowadzenie weryfikacji stacjonarności badanego procesu przepływu dwufazowego. Proces jest stacjonarny, wówczas gdy wszystkie jego momenty (np. średnia, wariancja) jak i momenty łączne (np. autokorelacja) są niezależne od czasu [97]. Istnieje wiele sposobów weryfikacji stacjonarności procesu losowego. Przepływ dwufazowy będzie spełniał wymogi stawiane procesom stacjonarnym, jeśli podstawowe czynniki fizyczne generujące analizowany przepływ, nie ulegną zmianie w czasie [98]. Istotne jest, aby przeprowadzanie testów stacjonarnych łączyło się z długą i wnikliwą obserwacją wizualną sygnału, tak by wyeliminować niestacjonarny charakter rozpatrywanego procesu losowego, uwzględniając jednocześnie każdą istotną niestacjonarność poprzez średniokwadratowy trend sygnału [97]. Podczas badań przepływu dwufazowego przeprowadzonych w pracy to obostrzenie wydaje się być spełnione, gdyż podstawowe czynniki (temperatura, ciśnienie, strumienie doprowadzanych faz oraz geometria minikanalów) kształtujące rejestrowany za pomocą kamery przepływ, nie ulegają istotnym zmianom w czasie jego trwania. Mimo to, często jednak, trudno jest w oparciu o bezpośrednie rozpatrywanie zjawiska dokonać rzetelnej weryfikacji stacjonarności procesu, dlatego też ważne jest, aby stacjonarność sygnału była zweryfikowana eksperymentalnie za pomocą badań. W związku z tym stosuje się odpowiednie testy stacjonarności. Zasadniczo, procedura testowania jest następująca [6]:

- sygnał należy podzielić na N jednakowych przedziałów czasowych, w taki sposób, aby przebiegi w każdym przedziale mogły być uznane za niezależne,
- dla każdego przedziału należy wyznaczyć wartość średniokwadratową i uszeregować wyznaczone wartości w porządku czasowym,
- zbadać ciąg wartości średniokwadratowych pod względem obecności głównego trendu, bądź innych zmian wynikających ze spodziewanej zmienności losowej.

Opisana procedura testowa nie musi się ograniczać jedynie do wartości średniokwadratowej [98]. W pracy, wykonano nieparametryczny test serii, polegający na badaniu liczby serii krótkoterminowych odchyłeń standardowych względem mediany tych odchyłeń, w celu pełnej weryfikacji tezy o stacjonarności procesu przepływu. Pod

pojęciem „serii” rozumie się sekwencję identycznych obserwacji, która następuje lub poprzedza inną obserwację lub nie poprzedza żadnej obserwacji. Test stacjonarności wykonano dla losowo wybranego przebiegu zmian poziomów szarości. Liczność próby odpowiadała liczbie klatek i wynosiła 1000, rejestrujących proces w czasie 3,78 sekund. Sygnał wejściowy w postaci dyskretnych czasowych zapisów średnich poziomów szarości, podzielono na $N=10$ takich samych przedziałów, czyli po 0,378 s. Wyznaczono odchylenia standardowe wartości poziomów szarości $STD(GL)$ w poszczególnych przedziałach, a także medianę odchyłeń, która wyniosła $Me(STD(GL)) = 17,63$.



Rys. 7.1. Test stacjonarności na przykładzie sygnału w postaci ciągu poziomów szarości, przepływ w minikanale o $D_h=4$ mm, $w_{sg}=5,46$ m/s, $w_{sl}= 0,71$ m/s, a) zmiany poziomu szarości w czasie, b) wynik testu stacjonarności

Przyjmując hipotezę o stacjonarności procesu przepływu dwufazowego dla poziomu istotności $\beta=5\%$, za pozytywny wynik test, zgodnie z tabelą poniżej (Tabela 7.2) należy przyjąć sytuację, gdy liczba serii zaobserwowanych w ciągu odchyłeń standardowych

względem mediany wyniesie co najmniej 3, ale nie więcej niż 8. Na podstawie przeprowadzonego testu odnoszącego się do badań własnych (Rys. 7.1) stwierdzono, występowanie 8 serii, co potwierdza stacjonarność przepływu.

Tabela 7.2. Wartość kwantyli $r_{n,\beta}$ rzędu $1 - \beta$ z rozkładu liczby serii w ciągu $N=2n$ obserwacji dla $\beta = Pr[r_n > r_{n,\beta}]$, [98]

n=N/2	β					
	0,99	0,975	0,95	0,05	0,025	0,01
5	2	2	3	8	9	9
6	2	3	3	10	10	11
7	3	3	4	11	12	12
8	4	4	5	12	13	13
9	4	4	5	12	13	13
10	5	6	6	15	15	16

7.2. Dobór odpowiedniego obszaru badawczego

Przed przystąpieniem do cyfrowej analizy obrazu określenie reprezentatywnego obszaru pomiarowego jest niezmiernie ważnym zagadnieniem. Obszar badawczy może tworzyć punkt, odcinek, powierzchnia lub objętość, a zatem wnioskowanie o strukturze przepływu na podstawie dynamiki procesu, wymaga dużej dokładności w jego doborze [41],[83]. Obszary te mają istotny wpływ na wyniki badań oraz wpływają na jakość analizy. Istnieją dwie możliwości doboru obszaru badawczego. Dla pomiarów globalnych, stosuje się **obszary powierzchniowe**, które są rozmieszczone na całej powierzchni analizowanego obrazu. Druga możliwość, dla pomiarów lokalnych, to **obszary punktowe** umiejscowione w wybranym obszarze o powierzchni dopasowanej do wielkości badanych obiektów np. pęcherza gazowego.

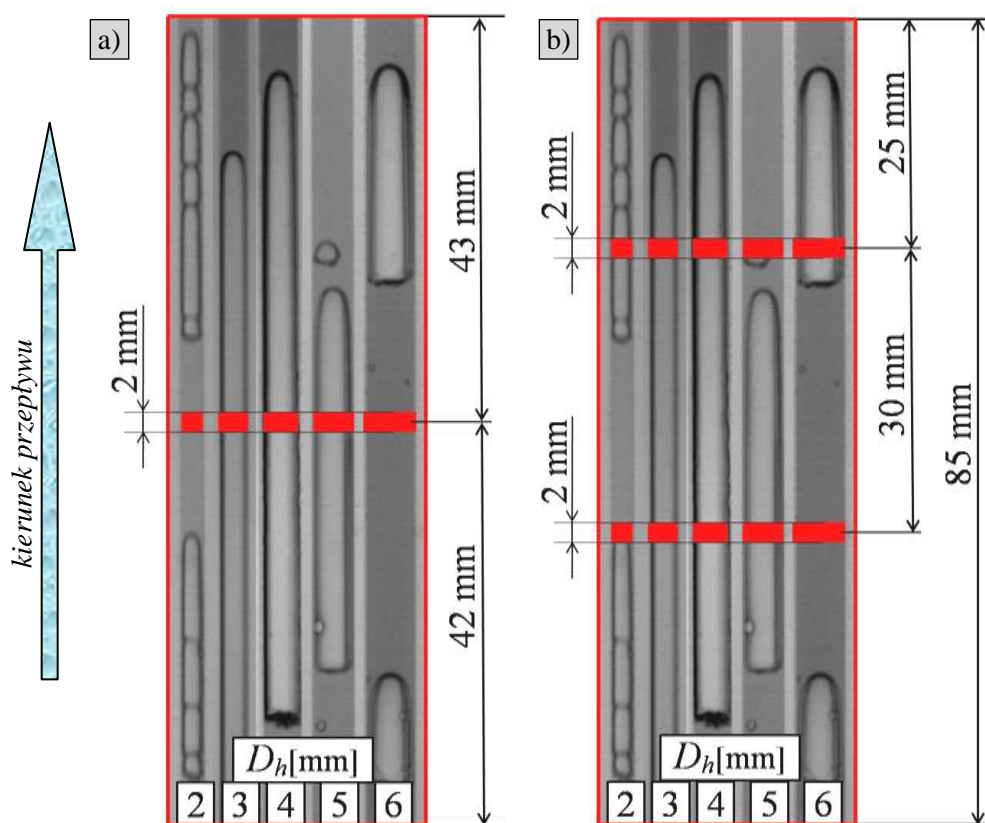
W przypadku zastosowania drugiej możliwości doboru obszaru, zazwyczaj umieszcza się kilka obszarów punktowych rozmieszczonych w kierunku przepływu, w równej odległości od siebie [39],[40]. Mimo wydłużonego czasu analizy ta metoda jest uważana za najbardziej uniwersalną, w związku z tym w niniejszej pracy zastosowano obszary punktowe do analizy obrazu.

Wybór odpowiedniego obszaru badawczego, jest zagadnieniem złożonym i wymaga wielu eksperymentów na rzeczywistym stanowisku badawczym. Wielokryterialność problemu związana ze znalezieniem reprezentatywnej próby oraz dynamiki zmian, wymaga dobrego poznania badanych zjawisk oraz konieczności dokonywania szeregu kompromisów [40]. Dlatego też decyzję o wielkości i kształcie

obszaru podjęto właśnie na podstawie analizy eksperymentalnej na własnym stanowisku badawczym.

W pracy dobrano dwa typy rozkładu obszarów akwizycji danych:

- służący do identyfikacji struktur przepływu na podstawie zmian poziomów szarości w czasie, pojedynczy obszar umiejscowiony na środku każdego minikanalu o wysokości 2 mm (24 piksele) w każdym minikanale oraz szerokości poszczególnego minikanalu (Rys. 7.2a). Wybór tego konkretnie obszaru był poprzedzony jak wspomniano wcześniej, analizą eksperymentalną na rzeczywistym stanowisku pomiarowym,
- dwa obszary oddalone od siebie o $l=30$ mm, każdy o wysokości 2 mm i całej szerokości poszczególnego minikanalu (Rys. 7.2b). Wybór tych reprezentatywnych obszarów pomiarowych poprzedzono badaniem prędkości przepływu struktur mieszaniny dwufazowej gaz-ciecz wzdłuż całej długości każdego minikanalu według Rys. 7.3. Szczegółową realizację tego zagadnienia opisano w kolejnym rozdziale. Zgodnie z przeprowadzoną analizą obszary te stanowiły podstawę do wyznaczania prędkości struktur gazowych.



Rys. 7.2. Rozmieszczenie obszarów badawczych do: a) identyfikacji struktur, b) wyznaczania prędkości fazy gazowej

7.3. Ocena ewolucji struktur gazowych

Prędkość przepływu struktur gazowych w minikanalach jest znaczącym parametrem opisującym hydrodynamikę przepływu oraz na zachodzące procesy wymiany pędu, ciepła i/lub masy. Prędkość rzeczywista faz zależy od ich właściwości, może być stała lub przyjmować zmienne wartości podczas przepływu przez minikanal. W celu wyboru reprezentatywnego obszaru pomiarowego badano prędkość przepływu mieszaniny dwufazowej gaz-ciecz wzdłuż całej długości minikanalu.

Zmiany prędkości analizowano zgodnie z obszarami badawczymi przedstawionymi na Rys. 7.3, dla wszystkich pięciu minikanalów. Najbardziej periodyczny charakter z pośród występujących struktur ma przepływ rzutowy dlatego tylko on został poddany analizie korelacyjnej. Wyraźne przemieszczanie fazy gazowej, w tym przepływie, pozwala na wyznaczenie czasu przepływu pomiędzy poszczególnymi obszarami akwizycji danych.

Do określenia prędkości wzdłuż przewodu wykorzystano funkcję korelacji wzajemnej. Funkcja ta, to iloczyn skalarny dwóch sygnałów w funkcji przesunięcia jednego z nich [101]:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau)dt \quad (7-1)$$

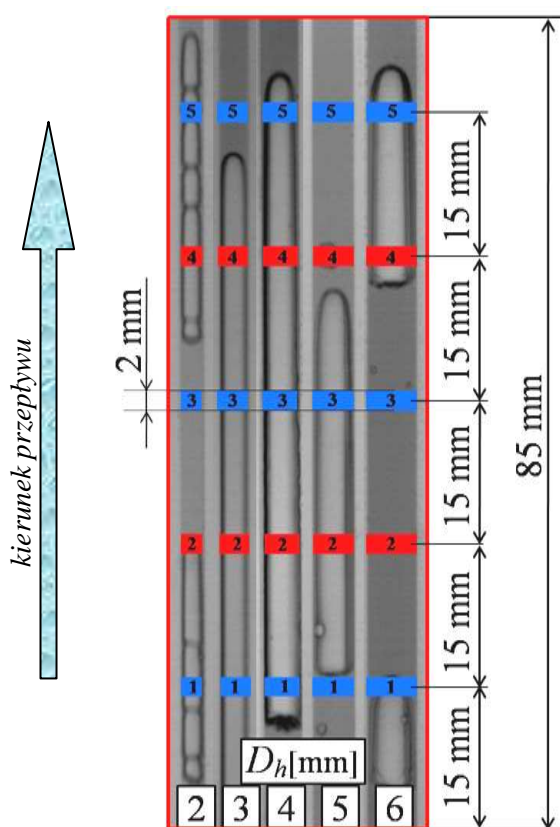
Funkcja korelacji wzajemnej ma wiele zastosowań, jednym z nich jest pomiar czasu opóźnienia. Polega on na określeniu czasu potrzebnego do przejścia sygnału przez dany układ. Jeżeli układ ten jest liniowy, to mierząc funkcję korelacji wzajemnej między sygnałem na wejściu (x), a sygnałem na wyjściu (y), można wyznaczyć bezpośrednio czas opóźnienia. Ponieważ sygnał na wyjściu z układu jest przesunięty w czasie względem sygnału na wejściu, to funkcja będzie wykazywała wyraźne maksimum przy wartości przesunięcia równej czasowi, który jest niezbędny do przejścia sygnału przez dany układ [60]. W przypadku zastosowania tej funkcji, wyłumienia „listków bocznych” dokonano przy wykorzystaniu okna Hamminga. Metoda ta została wybrana w oparciu o prace [6],[57], w których badacze podają, że ten rodzaj okna jest najczęściej wykorzystywany w przypadku funkcji korelacji. Wszystkie obliczenia związane z analizą stochastyczną wykonano w programie Matlab 7.0.

W przypadku zastosowania funkcji korelacji wzajemnej w przestrzeni minikanalów pomiarowych rozmieszczono w każdym z nich pięć obszarów badawczych oddalonych od siebie o znaną odległość l , a następnie rejestrowano zmiany poziomu szarości w funkcji czasu. Z funkcji korelacji wzajemnej określono związek pomiędzy wartościami poziomu szarości w wybranych miejscach zgodnie z Rys. 7.3. Wyznaczony czas opóźnienia

τ pozwolił na bezpośrednie określenie wartości prędkości przemieszczania się struktury gazowej według wzoru:

$$w_g = \frac{l}{\tau}. \quad (7-2)$$

Pojawiające się w wyniku zastosowania tej funkcji lokalne maksimum świadczy o wyraźnej tendencji do przemieszczenia się pęcherzy gazowych ze stałą prędkością. Na czasowych wykresach zmian poziomów szarości zobrazowano wzajemne przesunięcia struktur rzutowych, które zamieszczono na przebiegach korelacyjnych. Obszary badawcze wykorzystywane do obliczeń prędkości wzdłuż całej długości minikanatów, rozmieszczono zgodnie z Rys. 7.3.



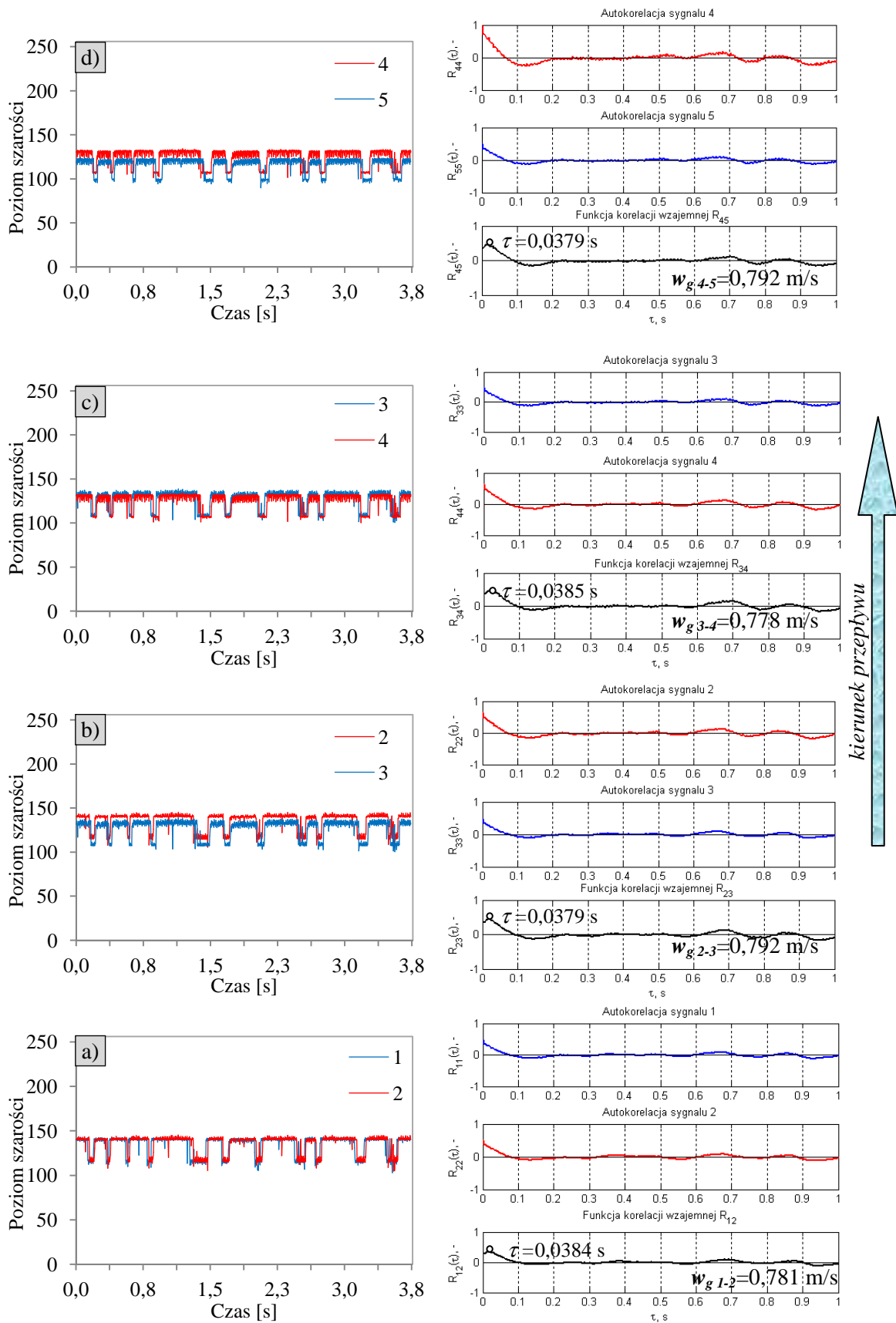
Rys. 7.3. Rozmieszczenie obszarów badawczych w minikanatach

Z funkcji korelacji wzajemnej w minikanale o $D_h=2$ mm (Rys. 7.4) wynika, że charakter zmian prędkości się struktur gazowych dla wyznaczonych obszarów badawczych jest minimalny o czym świadczy wartość średniej arytmetycznej prędkości ($w_g=0,786$ m/s). Kolejno badano prędkość przepływu struktur rzutowych w minikanale o $D_h=3$ mm (Rys. 7.5). Z analizy przebiegów korelacyjnych wynika, że prędkość dla obszarów badawczych 1-2, 3-4 oraz 4-5 jest taka sama i wynosi $w_g=1,32$ m/s. Z kolei prędkość fazy gazowej jest nieznacznie mniejsza dla obszaru 2-3 i wynosi $w_g=1,25$ m/s, odchylenie dla

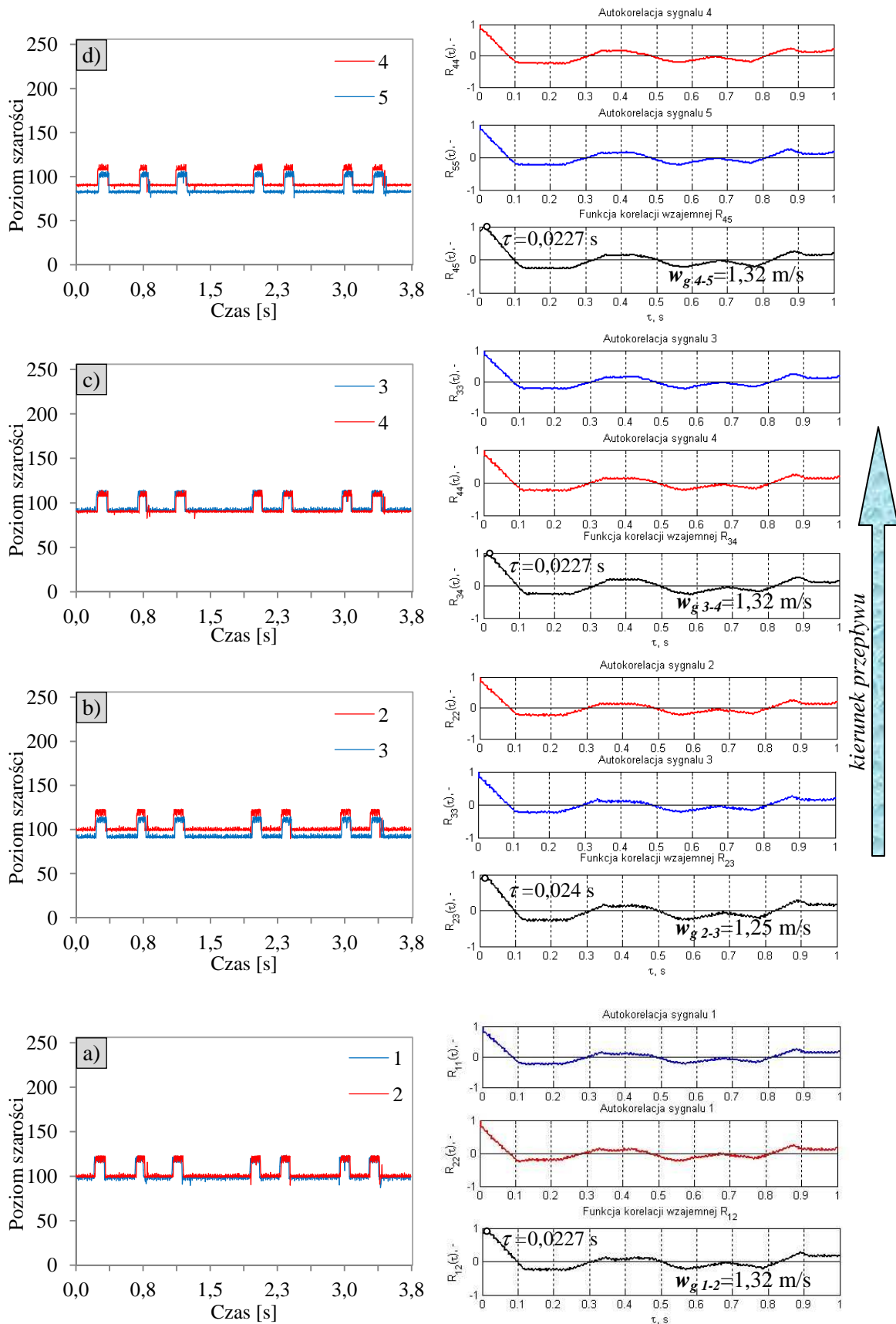
każdej prędkości wyznaczonej osobno jest nieznaczące, co potwierdza wartość wyznaczonej średniej arytmetycznej ($w_g = 1,30$ m/s), a więc prędkość ta jest stała o czym świadczą znikome zmiany. Następnie analizie poddano przepływ w minikanale o $D_h=4$ mm (Rys. 7.6). Wyznaczone prędkości wzrastają minimalnie na długości minikanalu, przyjmując kolejno wartości: $w_g=0,638$ m/s dla obszaru 1-2, $w_g=0,66$ m/s dla obszarów 2-3 i 3-4 oraz $w_g=0,68$ dla ostatniego obszaru 4-5. Natomiast wyznaczona wartość średniej arytmetycznej ($w_g=0,659$ m/s) świadczy o znikomych różnicach. Analizując zmiany prędkości na całej długości minikanalu o $D_h=5$ mm (Rys. 7.7) zauważono, że parametr ten przyjmuje takie same wartości dla wszystkich obszarów badawczych i wynosi $w_g=0,792$ m/s. Wyniki przeprowadzonych badań w minikanale o $D_h=6$ mm pod względem oceny prędkości przepływu przedstawiono na Rys. 7.8. Nieznacznie niższą wartość prędkości $w_g=0,44$ m/s otrzymano dla pierwszego i ostatniego obszaru pomiarowych, natomiast wyższą dla dwóch środkowych obszarów, gdzie przyjmuje ona wartość $w_g=0,46$ m/s. Można stwierdzić stałość charakteru przepływu struktur gazowych wzdłuż przewodu.

Biorąc pod uwagę wyniki pracy [62] nie podjęto analizy przepływu pierścieniowego gdyż jest on przypadkiem przepływu rozdzielonego w którym model poślizgu nie ma zastosowania. W tych przypadkach postaci widm korelacji wzajemnej były rozmyte i nie występowało jedno maksimum co świadczy o tym, że charakterystyczne formacje gazowe i cieczowe przemieszczały się z różnymi prędkościami. Natomiast przepływ porcji gazu i cieczy był chaotyczny a charakter przepływu niezdefiniowany.

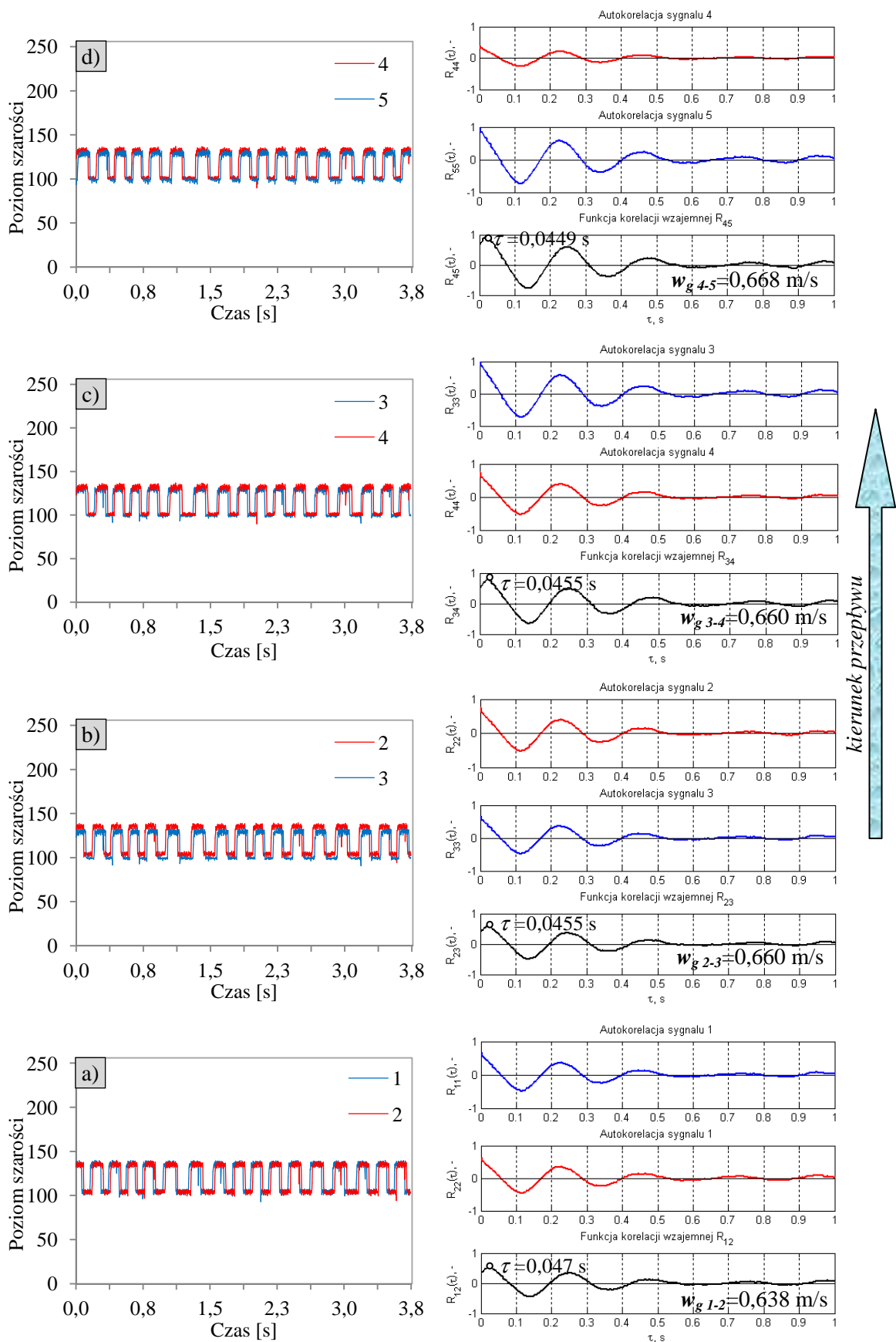
Przedstawiona na poniższych rysunkach (Rys. 7.4 do Rys. 7.8) ocena ewolucji prędkości na całej długości każdego minikanalu pomiarowego pozwala stwierdzić, że niewielkie zmiany tego parametru potwierdzają stałą jego wartość, co prowadzi do możliwości swobodnego wyboru umiejscowienia obszaru badawczego w minikanalach. Ostatecznie obszary akwizycji danych do obliczania prędkości rzeczywistych struktur rzutowych za pomocą funkcji korelacji wzajemnej we wszystkich minikanalach zostały przyjęte zgodnie z Rys. 7.2b). Warto tutaj zwrócić uwagę, że przyjęte w ten sposób obszary, przy stałym L_r w każdym minikanale, powodują zmianę stosunku L_r/D_h w poszczególnych minikanalach. Przy czym zmiana ta nie powoduje istotnego wpływu na przepływ w minikanalach.



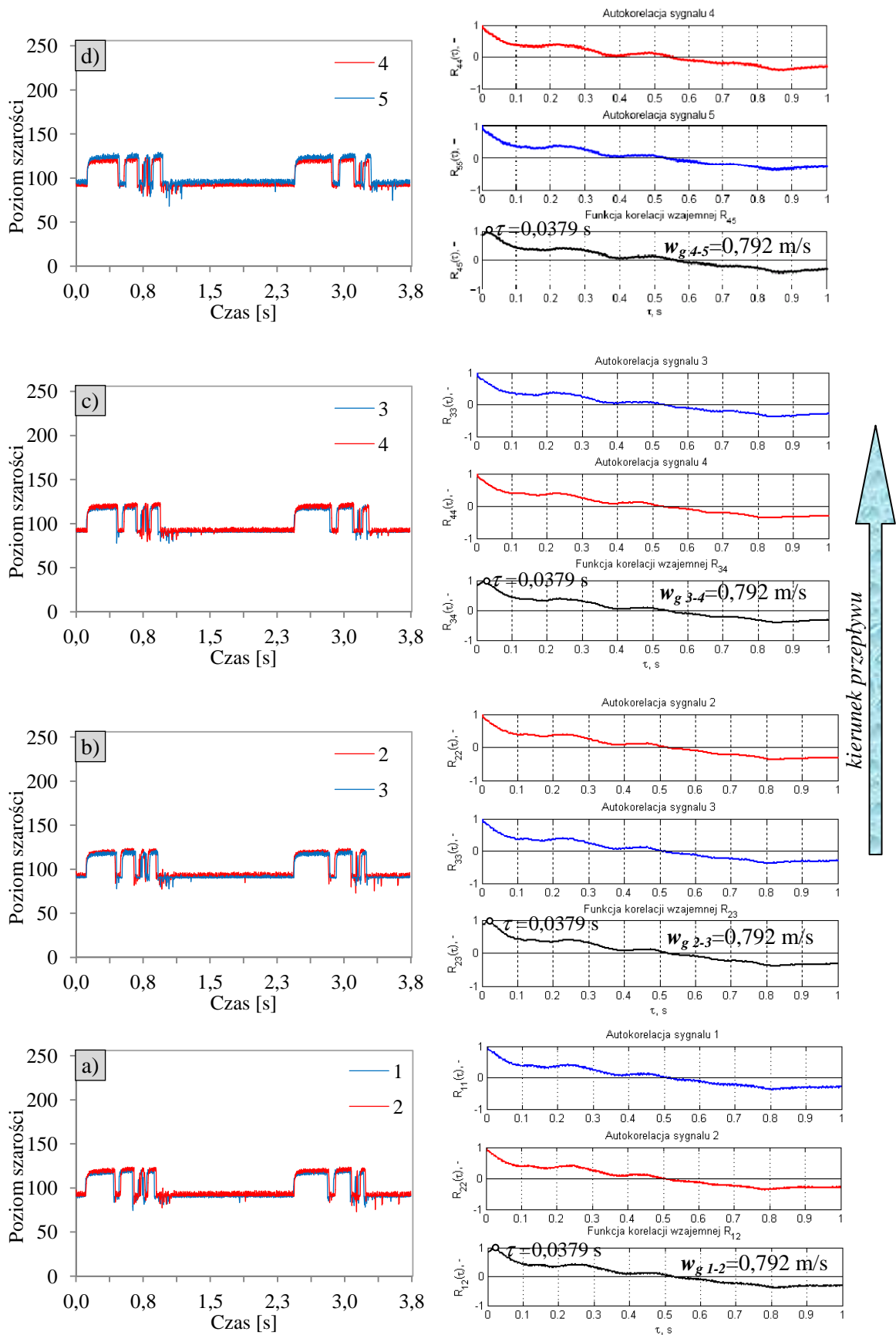
Rys. 7.4. Ewolucja prędkości ($w_{st}=0,14$ m/s, $w_{sg}=0,70$ m/s) dla obszarów badawczych: a) 1-2, b) 2-3, c) 3-4, d) 4-5 rozmieszczonych zgodnie z rys. 7.3 dla minikanatu o $D_h=2$ mm



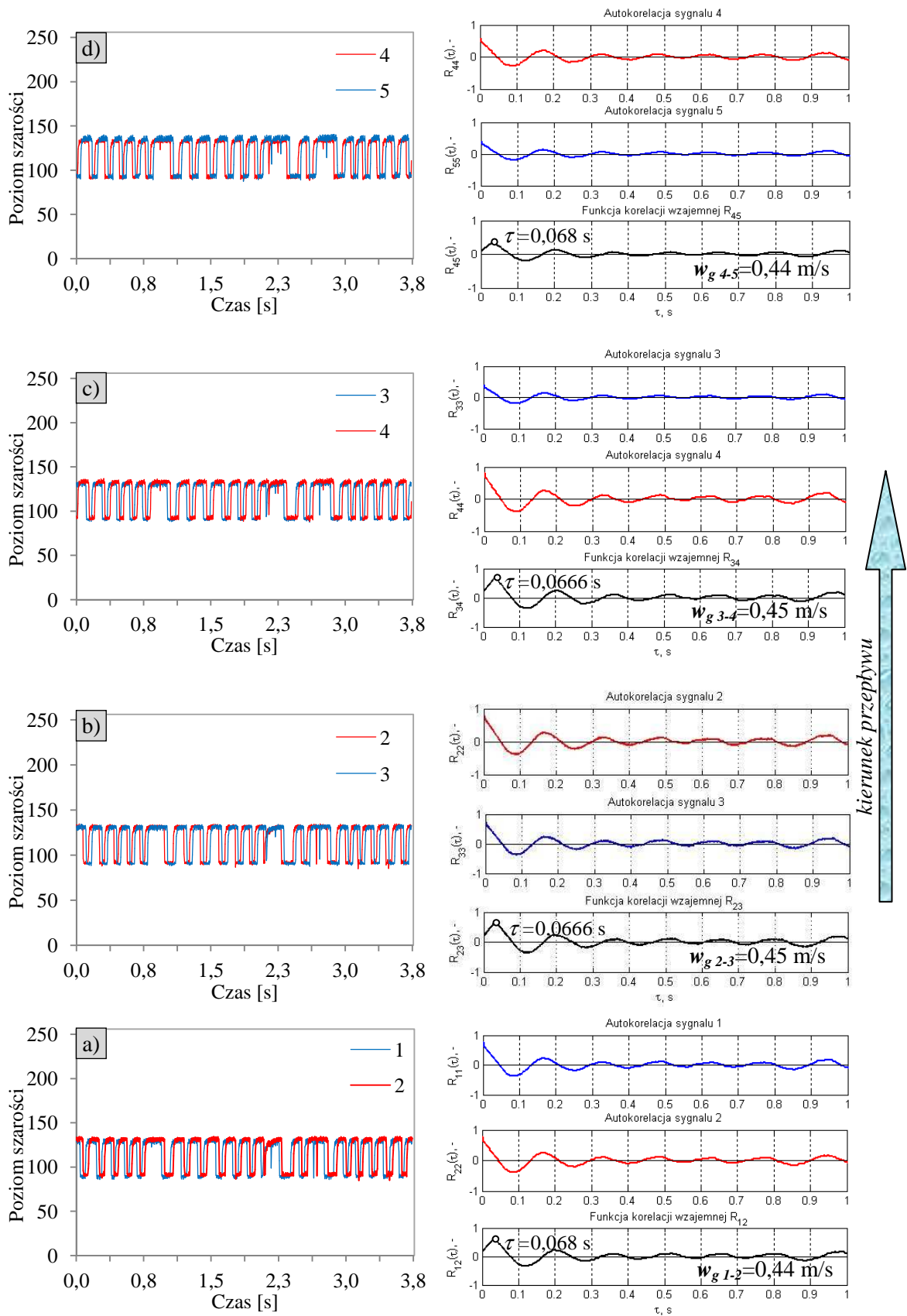
Rys. 7.5. Ewolucja prędkości ($w_{sl}=0,73$ m/s, $w_{sg}=0,22$ m/s) dla obszarów badawczych: a) 1-2, b) 2-3, c) 3-4, d) 4-5 rozmieszczonych zgodnie z rys. 7.3 dla minikanatu o $D_h=3$ mm



Rys. 7.6. Ewolucja prędkości ($w_{sl}=0,21$ m/s, $w_{sg}=0,31$ m/s) dla obszarów badawczych: a) 1-2, b) 2-3, c) 3-4, d) 4-5 rozmieszczonych zgodnie z rys. 7.3 dla minikanatu o $D_h=4$ mm



Rys. 7.7. Ewolucja prędkości ($w_{st}=0,33 \text{ m/s}$, $w_{sg}=0,33 \text{ m/s}$) dla obszarów badawczych: a) 1-2, b) 2-3, c) 3-4, d) 4-5 rozmieszczonych zgodnie z rys. 7.3 dla minikanatu o $D_h=5 \text{ mm}$



Rys. 7.8. Ewolucja prędkości ($w_{sl}=0,14$ m/s, $w_{sg}=0,32$ m/s) dla obszarów badawczych: a) 1-2, b) 2-3, c) 3-4, d) 4-5 rozmieszczonych zgodnie z rys. 7.3 dla minikanалу o $D_h=6$ mm

7.4. Analiza obrazu

Do cyfrowej analizy obrazu, posłużył program „Rozpoznawanie impulsów” [41], który realizuje dynamiczną analizę obrazu, poprzez obliczanie średniego poziomu szarości w określonym obszarze badawczym, w danej chwili pomiaru. Program „Rozpoznawanie Impulsów” podczas analizy obrazu, dokonuje różnorodnego przetwarzania informacji zawartych w obrazie i generuje wyniki w postaci plików zawierających dyskretny, czasowy zapis zmienności wybranej cechy, w postaci szeregów numerycznych, umożliwiając dalszą obróbkę [41]. Otrzymane w ten sposób szeregi numeryczne w dalszym etapie obróbki wyników badań, umożliwiają zastosowanie analizy stochastycznej procesów zachodzących w minikanalach, a jak wynika z pracy [98] można je bezpośrednio odnieść do chwilowych zmian koncentracji faz. Ponadto czasowa analiza poziomu szarości stanowi ważny parametr doboru i oceny cech konstrukcyjnych i eksploatacyjnych aparatów [62].

Poza dynamicznym obliczaniem uśrednionego poziomu szarości, program „Rozpoznawanie Impulsów” służy do oceny i rozpoznawania struktur przepływu dwufazowego gaz-ciecz w badanych minikanalach. Ocena ta odbywa się na podstawie charakteru czasowych zmian określonej cechy obrazu.

W prezentowanej pracy wartość średniego poziomu szarości, obliczono dla wszystkich obrazów zarejestrowanych sekwencji. Analizie poddano średni udział pikseli o określonej jasności w jednostce powierzchni obrazu. Cecha ta oznaczona została jako M i stanowi wartość średnią jasności pikseli, znajdujących się wewnątrz obszaru poddanego analizie. Czasowa funkcja jej zmian wyznacza stosunek jednej fazy do drugiej, poprzez określenie stosunku czarnych pikseli do białych. Wartość ta zawsze mieści się w przedziale od 0 do 255 i można ją opisać za pomocą następującej zależności [41]:

$$M_k = \frac{1}{(n-f)(o-m)} \sum_{j=f}^n \sum_{i=m}^o p_{i,j}^k \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (7-3)$$

gdzie:

(f,m) – współrzędne lewego górnego rogu strefy pomiarowej,

(n,o) – współrzędne prawego dolnego rogu strefy pomiarowej,

$p_{i,j}^k$ – wartość poziomu jasności piksela o współrzędnych (i,j) dla obrazu o numerze k będącego częścią sekwencji zawierającej N obrazów.

Natomiast wartość poziomu jasności liczona jest ze wzoru [41]:

$$p_{i,j}^k = \frac{RED(q_{i,j}^k) + GREEN(q_{i,j}^k) + BLUE(q_{i,j}^k)}{3} \quad (7-4)$$

gdzie:

$q_{i,j}^k$ – 24-bitowy kolor piksela o współrzędnych (i,j) dla sceny o numerze k ,

$RED(q_{i,j}^k)$ - wartość składowej koloru czerwonego dla piksela $q_{i,j}^k$,

$GREEN(q_{i,j}^k)$ - wartość składowej koloru zielonego dla piksela $q_{i,j}^k$,

$BLUE(q_{i,j}^k)$ - wartość składowej koloru niebieskiego dla piksela $q_{i,j}^k$.

Rezultatem tego działania jest ciąg uszeregowanych według czasu wartości średniego poziomu szarości. Udział powierzchniowy M , to cecha mająca zastosowanie zarówno jako parametr lokalny jak i globalny. Dodatkowo parametr ten pozwala na uzyskanie wyników nie tylko ilościowych, ale także jakościowych. W związku z tym można dokonywać zarówno pomiaru jak i wizualizacji zjawiska przepływu dwufazowego [40],[41].

Na potrzeby tej pracy, ograniczono się do procedury uśredniania cechy M , jednakże poza uśrednioną wartością poziomu szarości, Krótkiewicz [41] proponuje także inne cechy obrazu:

- długość linii brzegowej (E) – parametr stopnia dyspersji,
- gradient lokalny (G) – parametr stopnia jednorodności,
- wariancja (V) – parametr stopnia koalescencji.

8. Wyniki badań własnych

Badania przeprowadzono dla pięciu pionowych minikanatów pomiarowych o przekroju kwadratowym, przy czym badania te wykonano na tym samym układzie pomiarowym, dla każdego z minikanatów z osobna. Strumienie obu faz zmieniano w postępie geometrycznym i w każdym minikanale dokonano 84 pomiary. W celu zachowania identycznych parametrów przepływu utrzymano wyrównane prędkości pozorne obu faz we wszystkich badanych minikanatach. Prędkości te mieściły się w następujących zakresach $w_{sg} \in (0,13;30,0)$ m/s i $w_{st} \in (0,13;1,15)$ m/s.

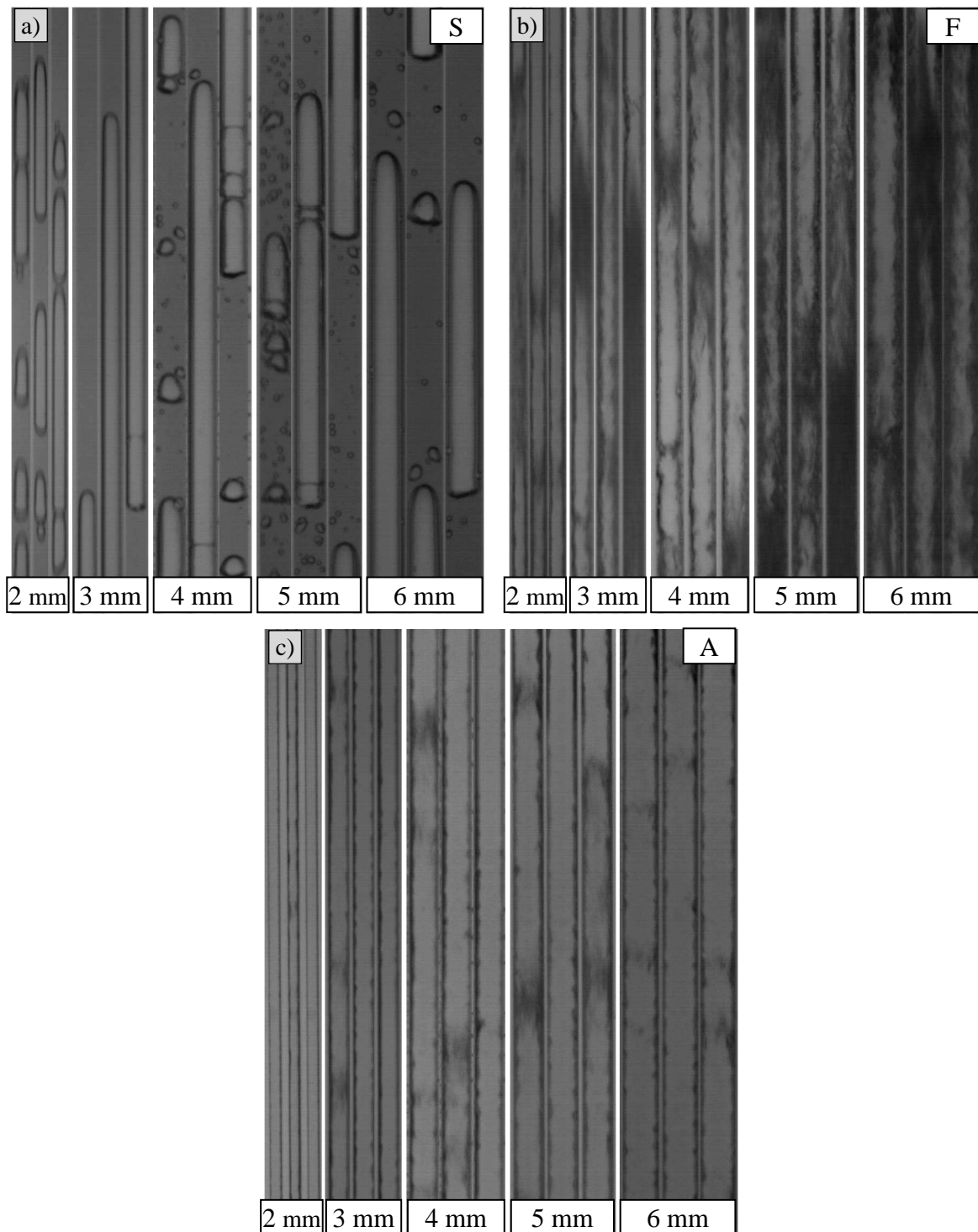
Dla wznoszącego przepływu gazu i cieczy, we wszystkich zbadanych minikanatach, sklasyfikowano trzy podstawowe struktury przepływu:

- ▶ przepływ rzutowy (**S**),
- ▶ przepływ pianowy (**F**),
- ▶ przepływ pierścieniowy (**A**).

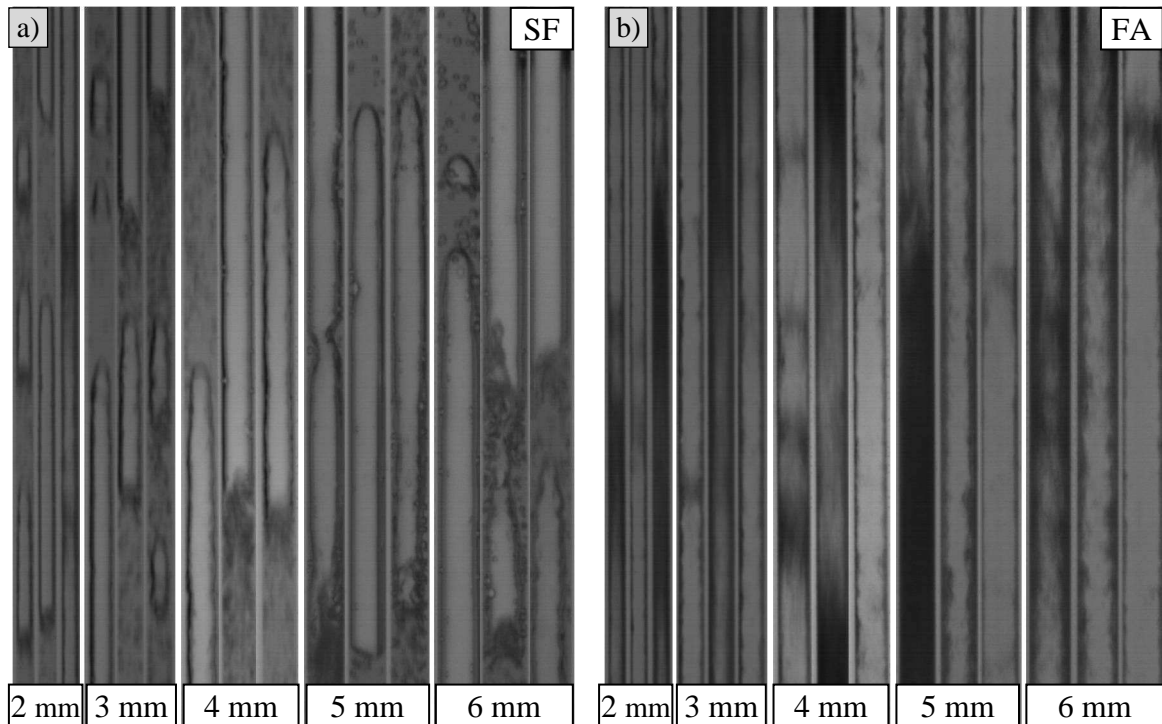
Zdecydowano wyróżnić także spośród nich dwie inne struktury, które potraktowano jako kombinację powyższych a mianowicie:

- ▶ przepływ rzutowo-pianowy (**SF**),
- ▶ przepływ pianowo-pierścieniowy (**FA**).

Na rysunkach poniżej (*Rys. 8.1* i *Rys. 8.2*), przedstawiono przykładowo obrazy zarejestrowanych struktur przepływu uzyskanych podczas wykonywania badań.



Rys. 8.1. Struktury przepływu w poszczególnych minikanalach przy stałych prędkościach pozornych gazu i cieczy: a) $w_{sg}=0,47-0,49$ m/s i $w_{sl}=0,32-0,35$ m/s dla przepływu rzutowego, b) $w_{sg}=5,46-5,82$ m/s i $w_{sl}=1,05-1,13$ m/s dla przepływu pianowego, c) $w_{sg}=27,41-28,39$ m/s i $w_{sl}=0,14-0,16$ m/s dla przepływu pierścieniowego



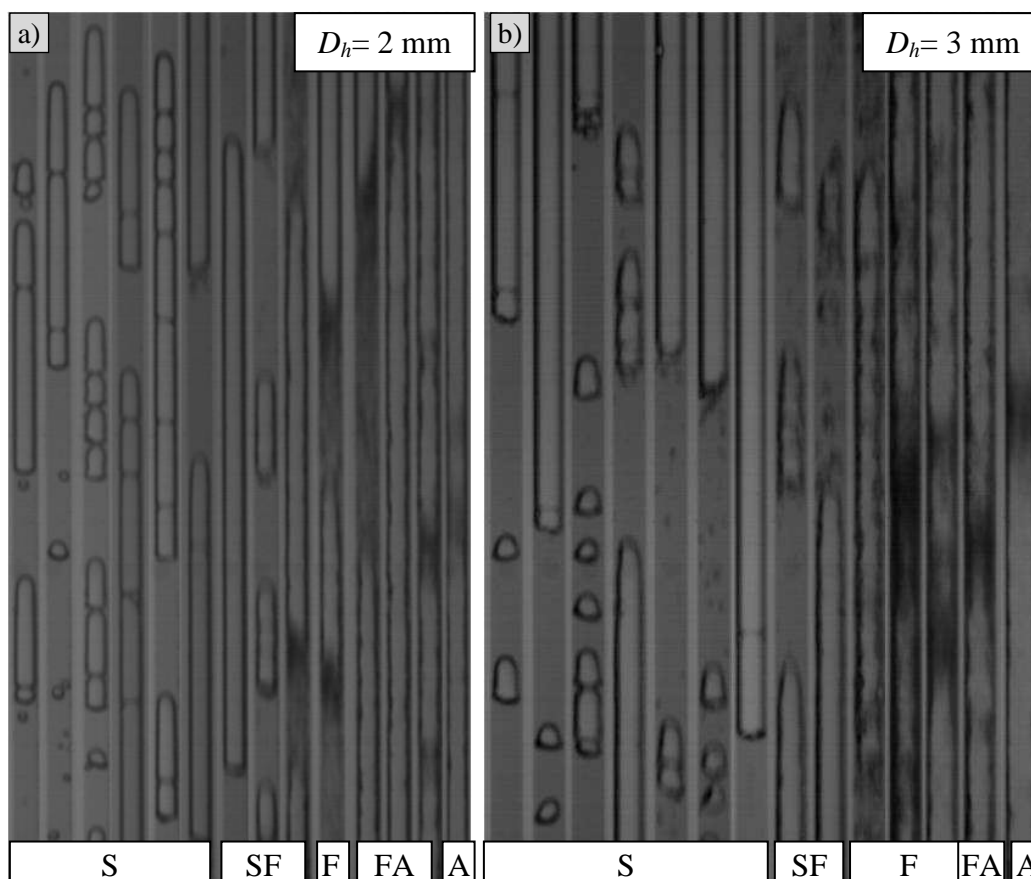
Rys. 8.2. Struktury przepływu w poszczególnych minikanałach przy stałych prędkościach pozornych gazu i cieczy: a) $w_{sg}=1,58-1,69$ m/s i $w_{sl}=1,05-1,13$ m/s dla przepływu rzutowo-pianowego, b) $w_{sg}=27,41-28,39$ m/s i $w_{sl}=1,05-1,13$ m/s dla przepływu pianowo-pierścieniowego

Na Rys. 8.3 zostały zestawione losowo wybrane pojedyncze obrazy stanowiące zdjęcie reprezentujące klatki filmów przepływów dwufazowych zarejestrowanych podczas badań. Obrazy te zostały uszeregowane według wzrastającej prędkości fazy gazowej od 0,13 do 30,0 m/s, zaś dla prędkości fazy ciekłej na wyrównanym poziomie od 0,32 do 0,35 m/s dla każdego z minikaniału. Obserwacja wizualna filmów w zwolnionym tempie pozwala stwierdzić występujące pewne różnice w hydrodynamice przepływu dwufazowego gaz-ciecz w poszczególnych minikanałach, co szczególnie zauważalne jest dla struktur rzutowych (Rys. 8.3).

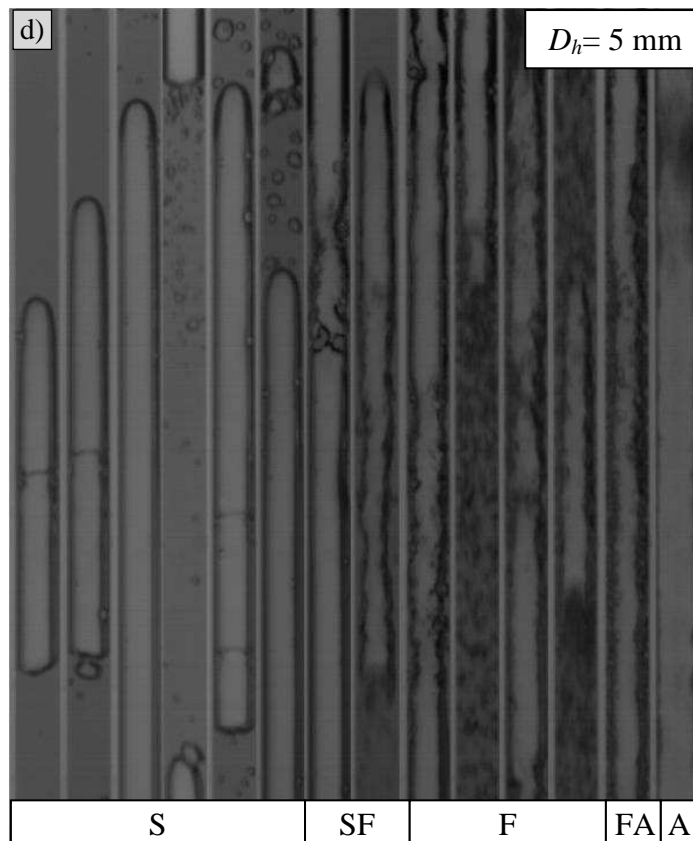
Dla wszystkich minikaniałów przy stałej prędkości fazy ciekłej $w_{sl}=0,32-0,35$ m/s i wzrastającej prędkości fazy gazowej w_{sg} zgodnie z wartościami przedstawionymi tabeli 8.1, zaobserwowano wszystkie sklasyfikowane poniżej struktury przepływu (Rys. 8.3).

Tabela 8.1. Wartości prędkości fazy gazowej w_{sg} dla stałej prędkości fazy ciekłej w_{sl} dla kolejnych rejestracji struktur w minikanalach pokazanych na Rys. 8.3

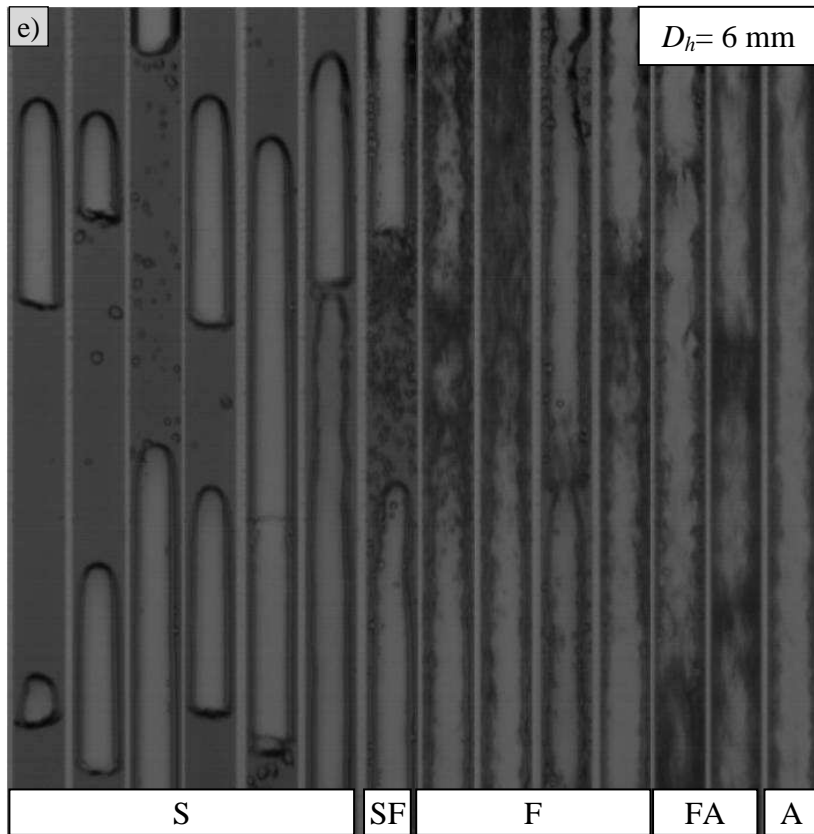
$D_h=2$ mm dla $w_{sl}= 0,35$ m/s													
w_{sg} [m/s]													
0,14	0,21	0,35	0,49	0,70	1,05	1,62	2,46	3,51	5,62	8,43	11,95	18,27	27,41
$D_h=3$ mm dla $w_{sl}= 0,32$ m/s													
w_{sg} [m/s]													
0,16	0,22	0,32	0,47	0,73	1,10	1,58	2,52	3,79	5,36	8,20	12,30	18,93	28,39
$D_h=4$ mm dla $w_{sl}= 0,32$ m/s													
w_{sg} [m/s]													
0,14	0,21	0,32	0,48	0,71	1,06	1,59	2,47	3,70	5,46	8,81	12,34	17,63	28,20
$D_h=5$ mm dla $w_{sl}= 0,33$ m/s													
w_{sg} [m/s]													
0,15	0,22	0,33	0,49	0,75	1,11	1,63	2,56	3,73	5,82	8,15	12,81	18,63	27,94
$D_h=6$ mm dla $w_{sl}= 0,32$ m/s													
w_{sg} [m/s]													
0,14	0,22	0,32	0,48	0,72	1,13	1,69	2,49	4,02	5,63	8,04	12,87	18,50	28,15



Rys. 8.3. Przykładowe obrazy zarejestrowanych przepływów uszeregowane według wzrastającej prędkości fazy gazowej w_{sg} (Tabela 8.1), przy stałej prędkości fazy ciekłej w_{sl} : a) $w_{sl}=0,35$ m/s dla $D_h=2$ mm, b) $w_{sl}=0,32$ m/s dla $D_h=3$ mm, c) $w_{sl}=0,32$ m/s dla $D_h=4$ mm, d) $w_{sl}=0,33$ m/s dla $D_h=5$ mm, e) $w_{sl}=0,32$ m/s dla $D_h=6$ mm



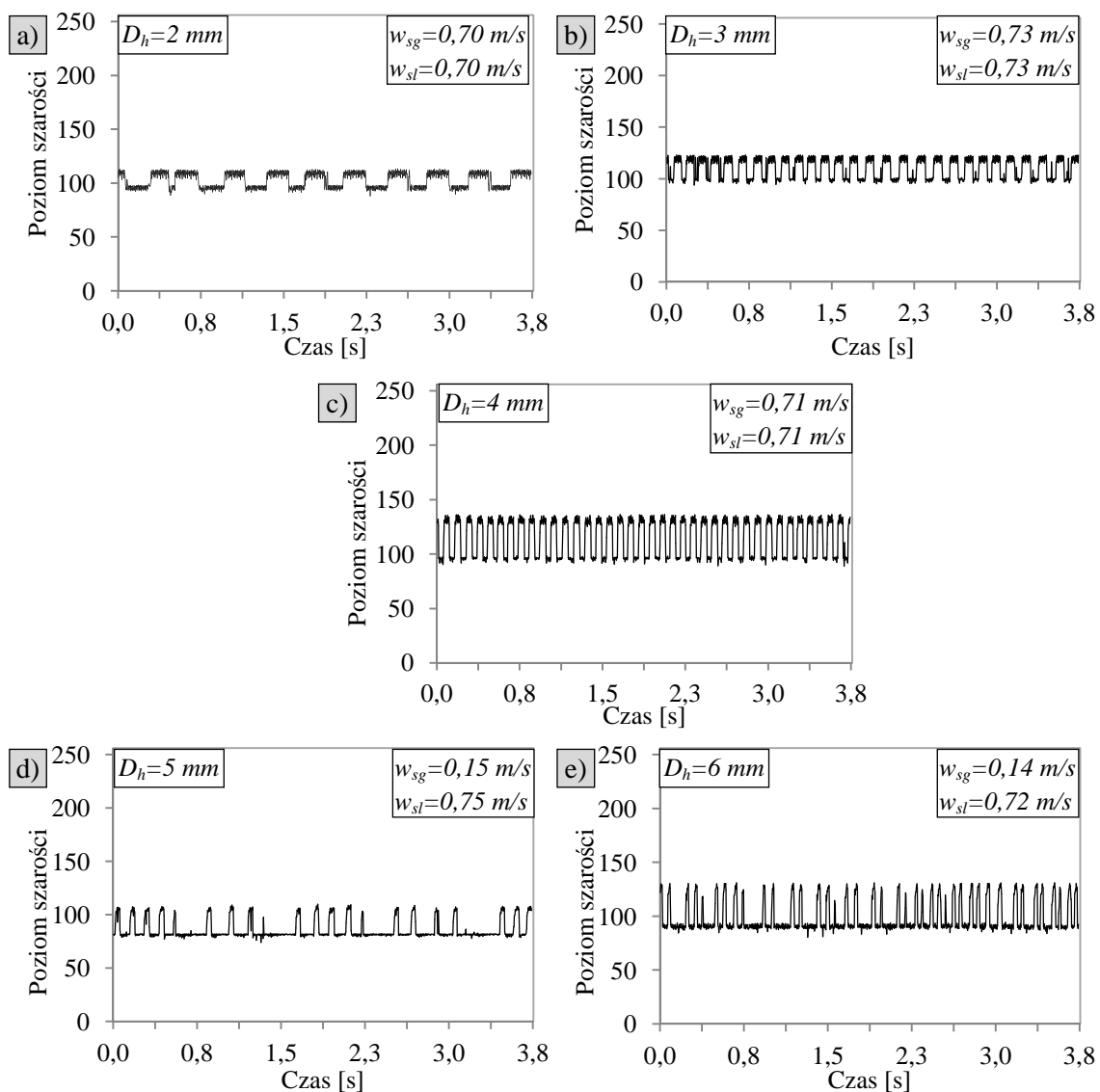
c.d. *Rys. 8.3*



c.d. *Rys. 8.3*

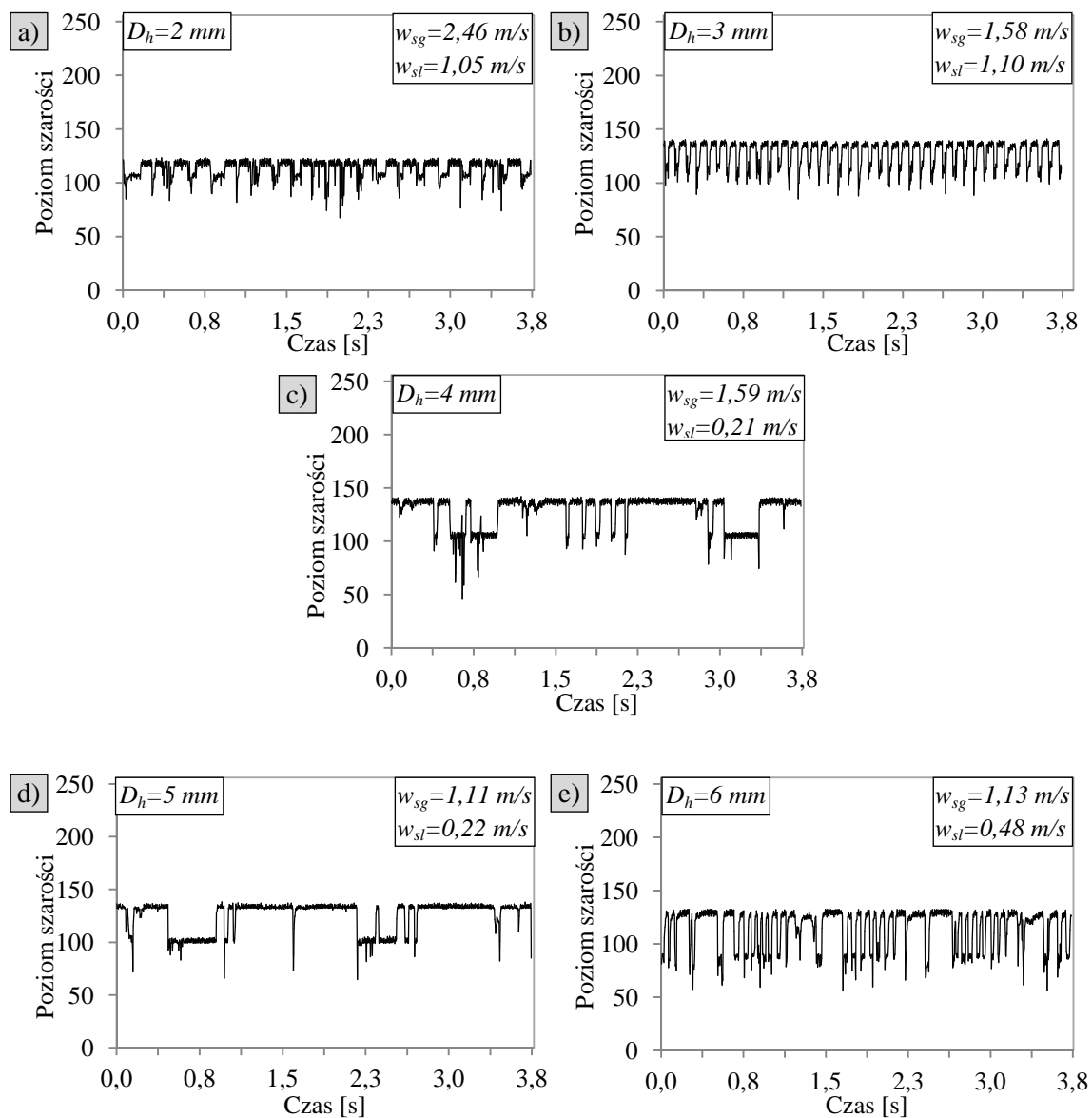
8.1. Identyfikacja struktur przepływu

W prezentowanej pracy struktury przepływu zostały określone na podstawie obserwacji wizualnej zarejestrowanych przepływów dwufazowych. Obok tej metody, przeprowadzono również ocenę struktury przy wykorzystaniu metod bazujących na analizie zmian poziomów szarości w czasie i funkcji gęstości prawdopodobieństwa a także posłużono się statystyką opisową poziomów szarości. W odróżnieniu od oceny wizualnej, której skuteczność jest czasem podważana, metoda oceny struktur przepływu bazująca na funkcjach stochastycznych jest obiektywna i dokładniejsza [25], [42], [62].

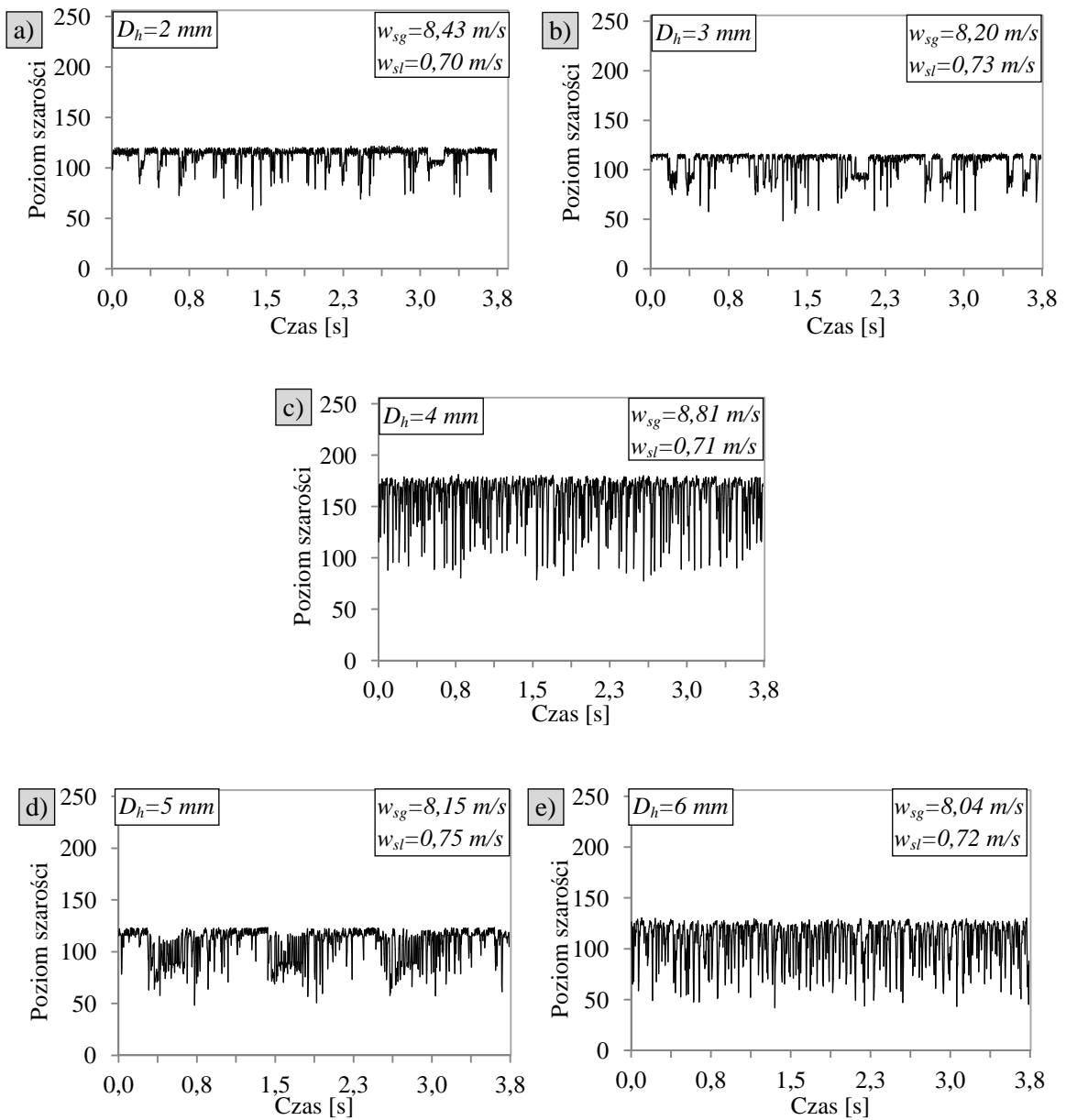


Rys. 8.4. Przebiegi poziomu szarości dla struktury rzutowej (S) w minikanalach:
a) $D_h = 2 \text{ mm}$, b) $D_h = 3 \text{ mm}$, c) $D_h = 4 \text{ mm}$, d) $D_h = 5 \text{ mm}$, e) $D_h = 6 \text{ mm}$

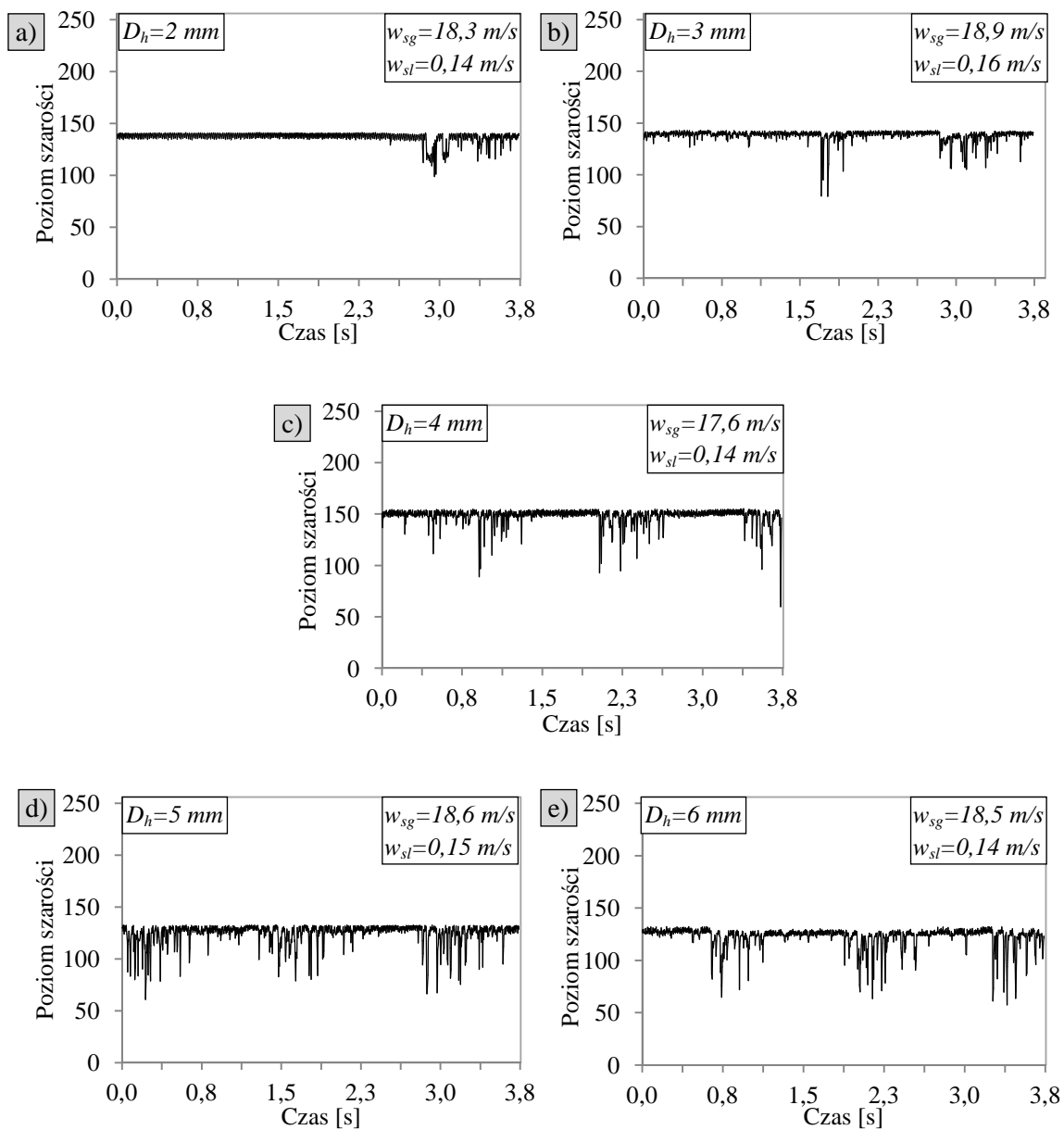
Na rysunkach (Rys. 8.4- Rys. 8.8) przedstawiono czasowe przebiegi zmian poziomów szarości podczas przepływu przez poszczególne minikanaly odpowiednio dla struktury: rzutowej, rzutowo-pianowej, pianowej, pianowo-pierścieniowej i pierścieniowej.



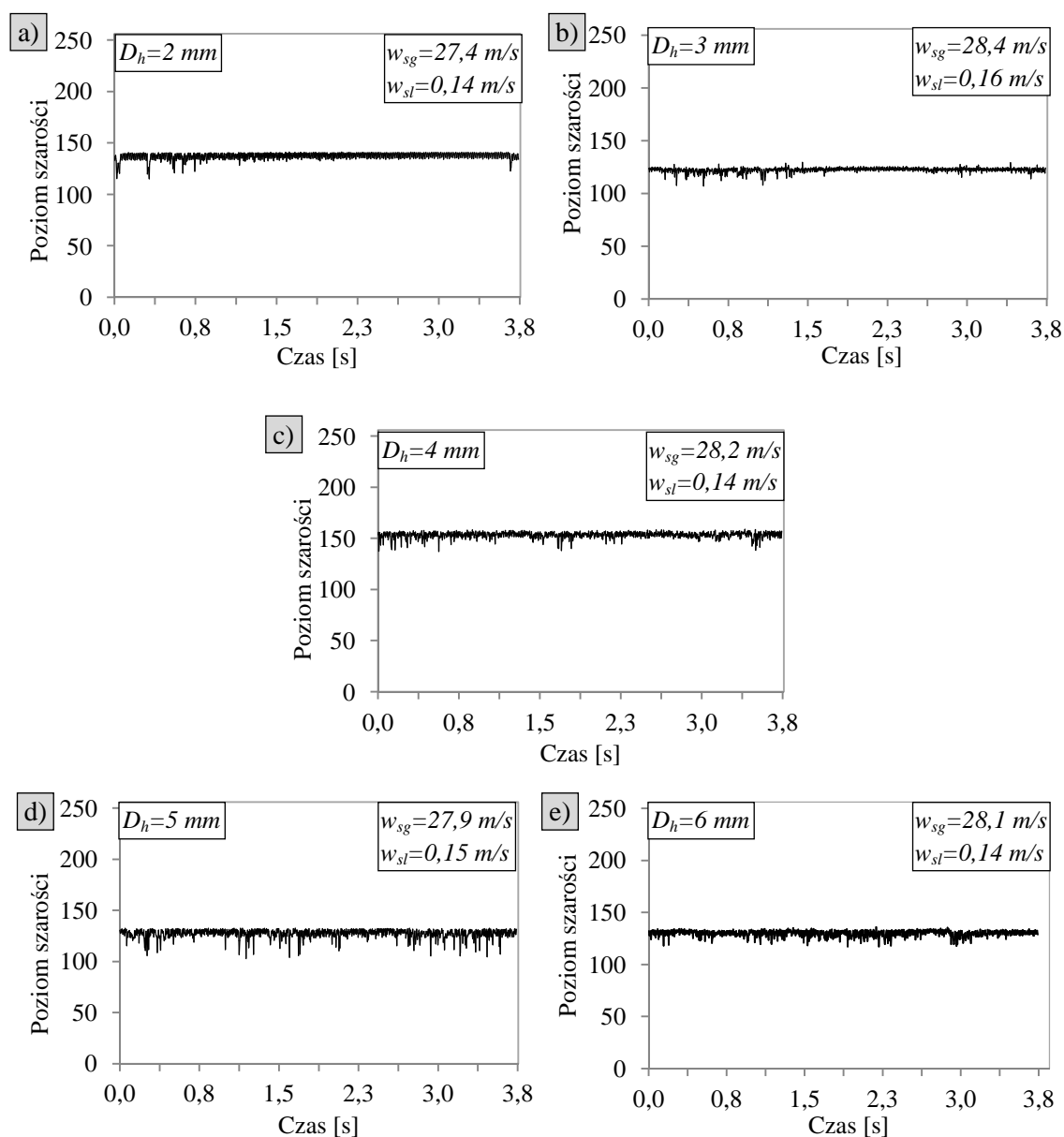
Rys. 8.5. Przebiegi poziomu szarości dla struktury rzutowo-pianowej (SF) w minikanalach: a) $D_h = 2 \text{ mm}$, b) $D_h = 3 \text{ mm}$, c) $D_h = 4 \text{ mm}$, d) $D_h = 5 \text{ mm}$, e) $D_h = 6 \text{ mm}$



Rys. 8.6. Przebiegi poziomu szarości dla struktury pianowej (F) w minikanalach:
 a) $D_h = 2 \text{ mm}$, b) $D_h = 3 \text{ mm}$, c) $D_h = 4 \text{ mm}$, d) $D_h = 5 \text{ mm}$, e) $D_h = 6 \text{ mm}$



Rys. 8.7. Przebiegi poziomu szarości dla struktury pianowo-pierścieniowej (FA) w minikanalach: a) $D_h = 2 \text{ mm}$, b) $D_h = 3 \text{ mm}$, c) $D_h = 4 \text{ mm}$, d) $D_h = 5 \text{ mm}$, e) $D_h = 6 \text{ mm}$

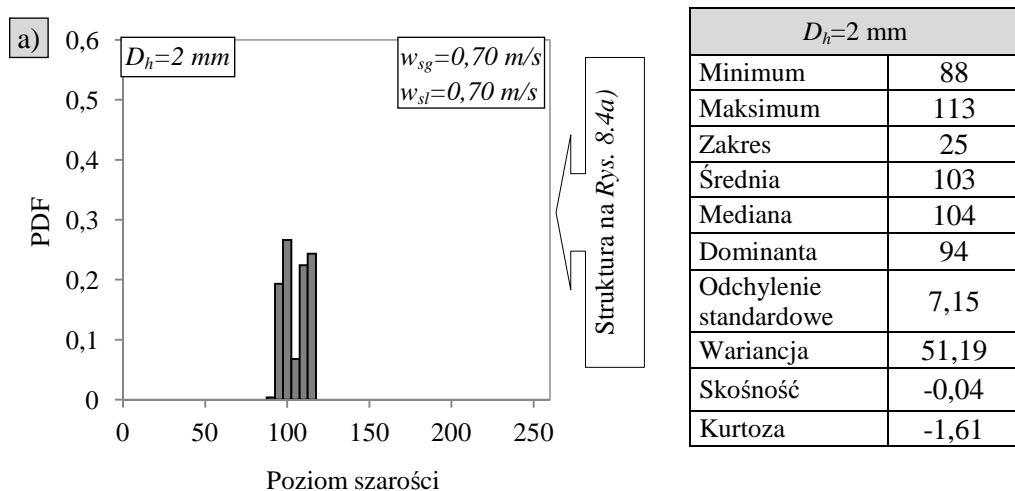


Rys. 8.8. Przebiegi poziomu szarości dla struktury pierścieniowej (A) w minikanalach:
 a) $D_h=2\text{ mm}$, b) $D_h=3\text{ mm}$, c) $D_h=4\text{ mm}$, d) $D_h=5\text{ mm}$, e) $D_h=6\text{ mm}$

Porównując otrzymane wykresy dla przepływu rzutowego (Rys. 8.4) w poszczególnych minikanalach można zauważyć, że dla tych samych prędkości pozornych faz wraz ze zwiększeniem średnicy minikanалу pojawia się coraz więcej pęcherzy gazowych w przepływie. Z kolei dla struktury pianowej i pianowo-pierścieniowej (Rys. 8.6, Rys. 8.7), zauważono, że im większa średnica hydrauliczna minikanалу, tym większy wzrost oscylacji poziomów szarości w czasie. Natomiast w przypadku struktury pierścieniowej czasowe przebiegi poziomów szarości we wszystkich minikanalach oscylowały na podobnym poziomie (Rys. 8.8). Dla wyznaczonych w ten sposób zmian poziomów szarości w czasie, dla obszarów badawczych rozmieszczonych wg schematu na Rys. 7.2a,

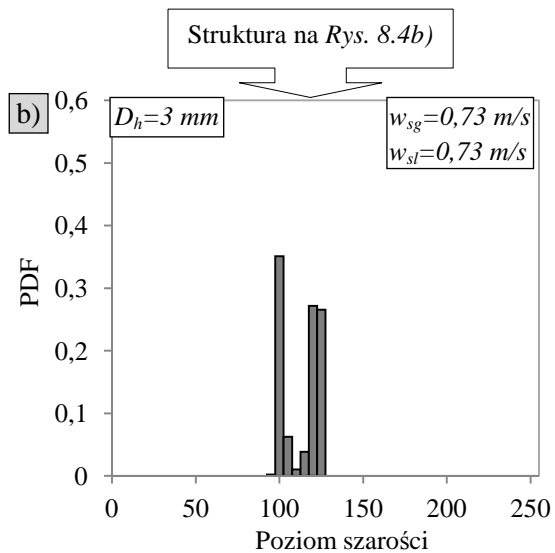
zastosowano funkcje gęstości prawdopodobieństwa. Dziedziną tej funkcji stochastycznej był poziom szarości, a przedziały histogramu ustalono na szerokości 5 pikseli. Prawdopodobieństwo zdarzeń zliczano na odcinku skali szarości od 0 do 255, który został podzielony na 51 równych części. Wstępną analizę możliwości wykorzystania kształtu funkcji PDF w minikanalach przedstawiono w pracy [90], jej kształt pozwolił na dokładną identyfikację przepływu mieszaniny dwufazowej w minikanalach. Ocenę struktur przepływu przy wykorzystaniu tej metody przeprowadzono dla wszystkich średnic hydraulicznych, co pozwoliło ocenić ich wpływ na charakterystykę hydrodynamiczną zjawisk zachodzących w poszczególnych minikanalach.

Poniżej przedstawiono przykładowe wykresy funkcji PDF, których poszczególne kształty zostały przyporządkowane do odpowiednich struktur, i odnoszą się one do badań pokazanych wcześniej na Rys. 8.4 do Rys. 8.8. Ocenę struktur na podstawie kształtu przebiegów czasowych i funkcji PDF, uzupełniono o wartości podstawowych parametrów stochastycznych w tabelach od 8.2 do 8.5 oraz na Rys. 8.9. Warto zwrócić uwagę, że wartość średnia nie jest przydatna w tym przypadku do identyfikacji dynamiki zjawisk zachodzących w minikanalach. Mimo, że nie można przyjmować wprost konkretnych wartości zarówno maksymalnych i minimalnych (a zatem i zakresu) jak również wartości odchylenia standardowego, jako parametru dla danych struktur, to jednak zauważa się pewną tendencję. Mianowicie ww. wielkości rosną wraz ze wzrostem prędkości pozornej gazu dla wszystkich minikanalów. Wyjątkiem jest przepływ pierścieniowy (czyli dla największych prędkości pozornych gazu) dla którego następuje znaczny spadek wartości ww. paramentów.

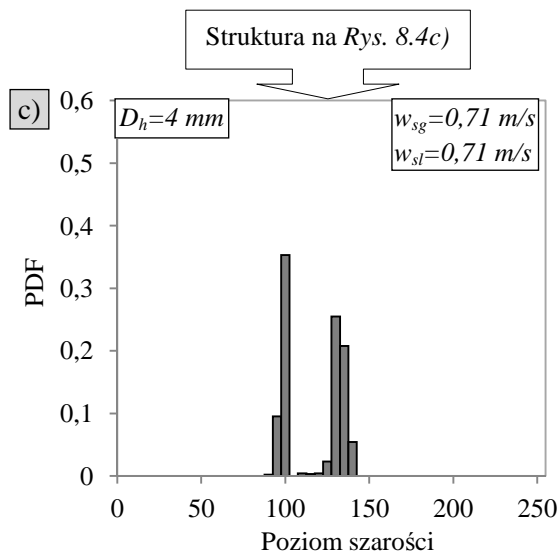


Rys. 8.9. Zestawienie dla struktury rzutowej (S) rozkładu funkcji gęstości prawdopodobieństwa oraz parametrów statystycznych w minikanalach:

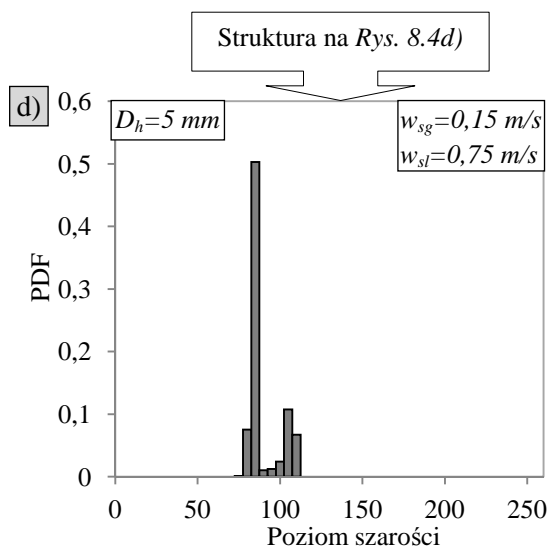
a) $D_h=2\text{ mm}$, b) $D_h=3\text{ mm}$, c) $D_h=4\text{ mm}$, d) $D_h=5\text{ mm}$, e) $D_h=6\text{ mm}$



$D_h=3\text{ mm}$	
Minimum	94
Maksimum	123
Zakres	29
Średnia	111
Mediana	116
Dominanta	99
Odchylenie standardowe	10,28
Wariancja	105,84
Skośność	-0,22
Kurtoza	-1,77

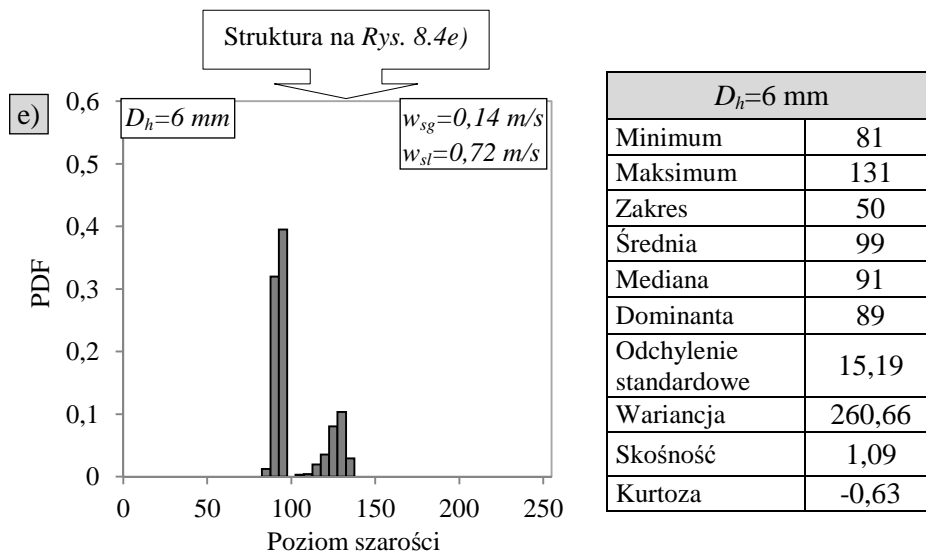


$D_h=4\text{ mm}$	
Minimum	89
Maksimum	136
Zakres	47
Średnia	115
Mediana	116
Dominanta	95
Odchylenie standardowe	17,45
Wariancja	304,63
Skośność	-0,13
Kurtoza	-1,89



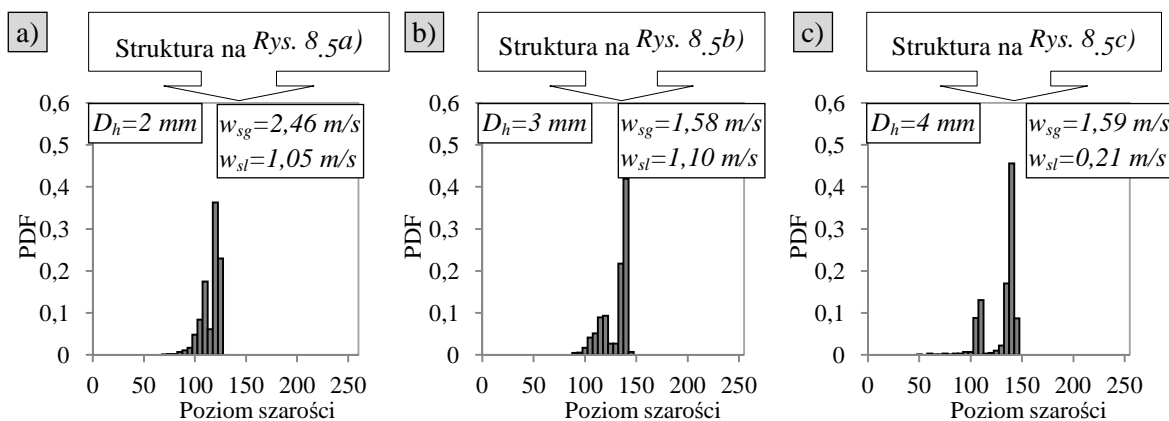
$D_h=5\text{ mm}$	
Minimum	74
Maksimum	110
Zakres	36
Średnia	86
Mediana	82
Dominanta	82
Odchylenie standardowe	9,16
Wariancja	83,95
Skośność	1,49
Kurtoza	0,41

c.d. Rys. 8.9

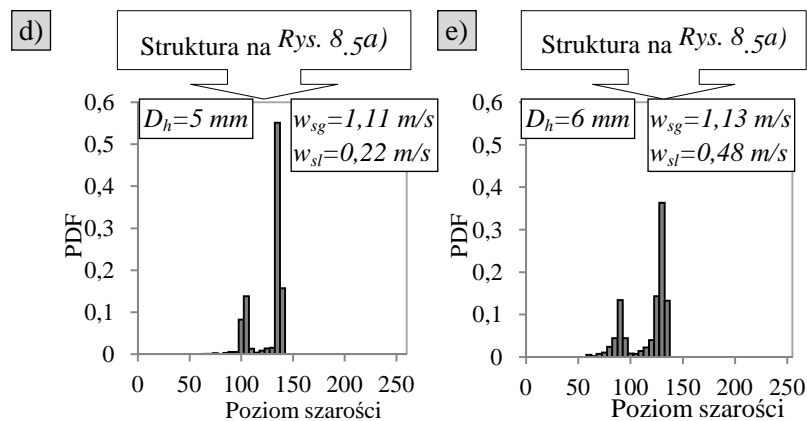


c.d. **Rys. 8.9**

Struktura rzutowa charakteryzuje się dwoma maksimumami lokalnymi funkcji, co można zaobserwować na przedstawionych wykresach (*Rys. 8.9*). Dla przykładu D_h od 2 do 4 mm, w których przepływ występuje dla tych samych prędkości pozornych gazu i cieczy, różnica pomiędzy dwoma maksimumami jest nieznaczna, z minimalną dominacją fazy ciekłej. Niskie wartości ujemne współczynnika skośności (-0,22;-0,04) świadczą o tym, że funkcja PDF jest lewostronnie skośna, ale jej rozkład jest zbliżony do rozkładu symetrycznego. Natomiast rozkład funkcji PDF dla D_h równego 5 i 6 mm jest prawostronnie skośny (1,49 i 1,09) z wyraźną dominacją fazy ciekłej, co w tym przypadku jest spowodowane większą prędkością pozorną fazy ciekłej w stosunku do prędkości pozornej fazy gazowej.



Rys. 8.10. Rozkład funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla struktury rzutowo-pianowej (SF) w minikanalach: a) $D_h=2\text{ mm}$, b) $D_h=3\text{ mm}$, c) $D_h=4\text{ mm}$, d) $D_h=5\text{ mm}$, e) $D_h=6\text{ mm}$

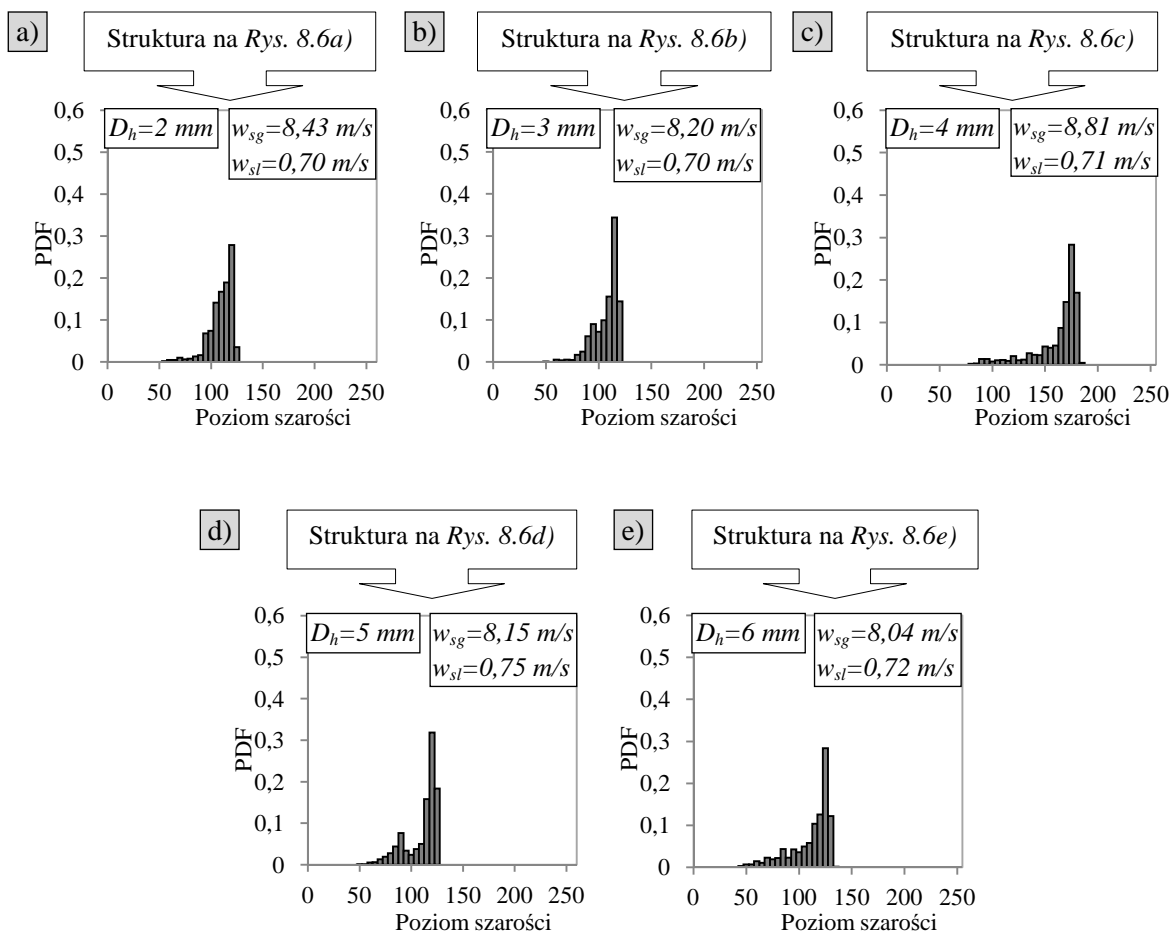


c.d. **Rys. 8.10**

Struktura rzutowo-pianowa charakteryzuje się również dwoma maksimumami lokalnymi funkcji, jednak w tym przypadku zawsze występuje znaczna dominacja fazy gazowej w stosunku do fazy ciekłej, w związku z tym rozkład funkcji gęstości prawdopodobieństwa jest zawsze lewostronnie asymetryczny (*Rys. 8.10* i *Tabela 8.2*). Generalnie struktura ta występuje w większości minikanalów w momencie, gdy prędkość pozorna gazu jest większa od prędkości pozornej cieczy.

Tabela 8.2. Parametry statystyczne przebiegów czasowych dla struktury rzutowo-pianowej (SF) w poszczególnych minikanalach (*Rys. 8.10*)

SF	Średnica hydrauliczna minikanалу D_h [mm]				
	2	3	4	5	6
<i>Prędkości pozorne</i>	$w_{sg}=2,46$ m/s $w_{sl}=1,05$ m/s	$w_{sg}=1,58$ m/s $w_{sl}=1,10$ m/s	$w_{sg}=1,59$ m/s $w_{sl}=0,21$ m/s	$w_{sg}=1,11$ m/s $w_{sl}=0,22$ m/s	$w_{sg}=1,13$ m/s $w_{sl}=0,48$ m/s
Minimum	67	85	45	65	56
Maksimum	123	141	141	138	133
Zakres	56	56	96	73	77
Średnia	113	127	128	125	114
Mediana	116	134	135	132	125
Dominanta	119	136	136	133	126
Odchylenie standardowe	8,87	12,45	15,25	14,66	19,13
Wariancja	78,6	154,9	232,63	215,04	366,02
Skośność	-1,32	-0,19	-1,44	-1,22	-0,97
Kurtoza	1,91	-1,03	1,55	0,08	-0,57

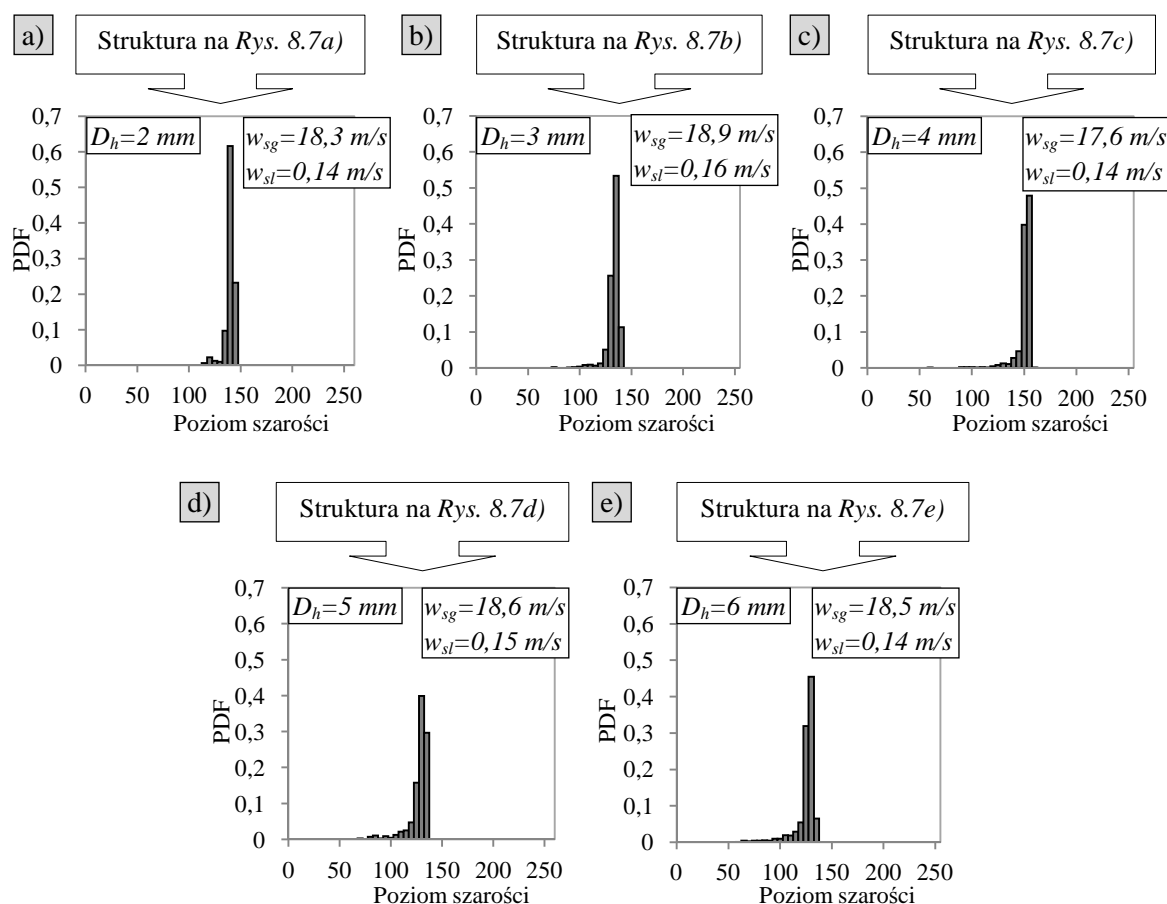


Rys. 8.11. Rozkład funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla struktury pianowej (F) w minikanalach: a) $D_h = 2 \text{ mm}$, b) $D_h = 3 \text{ mm}$, c) $D_h = 4 \text{ mm}$, d) $D_h = 5 \text{ mm}$, e) $D_h = 6 \text{ mm}$

Struktura pianowa charakteryzuje się pojedynczym prawostronnym maksimum funkcji oraz szerokim widmem o łagodnym narastającym przebiegu (Rys. 8.11). Mimo iż zakres wartości funkcji przyjmuje podobne wartości jak w przypadku struktury rzutowo-pianowej, to jednak istnieje łatwość ich rozróżnienia ze względu na kształt widma. Podobnie do struktury rzutowo-pianowej, rozkład funkcji PDF dla przepływu pianowego jest zawsze lewostronnie skośny (Tabela 8.3).

Tabela 8.3. Parametry statystyczne przebiegów czasowych dla struktury pianowej (*F*) w poszczególnych minikanalach (Rys. 8.11)

F	Średnica hydrauliczna minikanалу D_h [mm]				
	2	3	4	5	6
Prędkości pozorne	$w_{sg}=8,43$ m/s $w_{sl}=0,70$ m/s	$w_{sg}=8,20$ m/s $w_{sl}=0,73$ m/s	$w_{sg}=8,81$ m/s $w_{sl}=0,71$ m/s	$w_{sg}=8,15$ m/s $w_{sl}=0,75$ m/s	$w_{sg}=8,04$ m/s $w_{sl}=0,72$ m/s
Minimum	58	49	77	48	42
Maksimum	122	117	181	123	130
Zakres	64	68	104	75	88
Średnia	113	107	160	108	107
Mediana	115	112	169	115	117
Dominanta	115	114	170	122	124
Odchylenie standardowe	9,11	11,89	22,06	15,55	19,54
Wariancja	83,04	141,25	486,62	241,76	381,88
Skośność	-2,52	-1,75	-1,75	-1,27	-1,32
Kurtoza	7,02	2,76	2,42	0,60	0,91



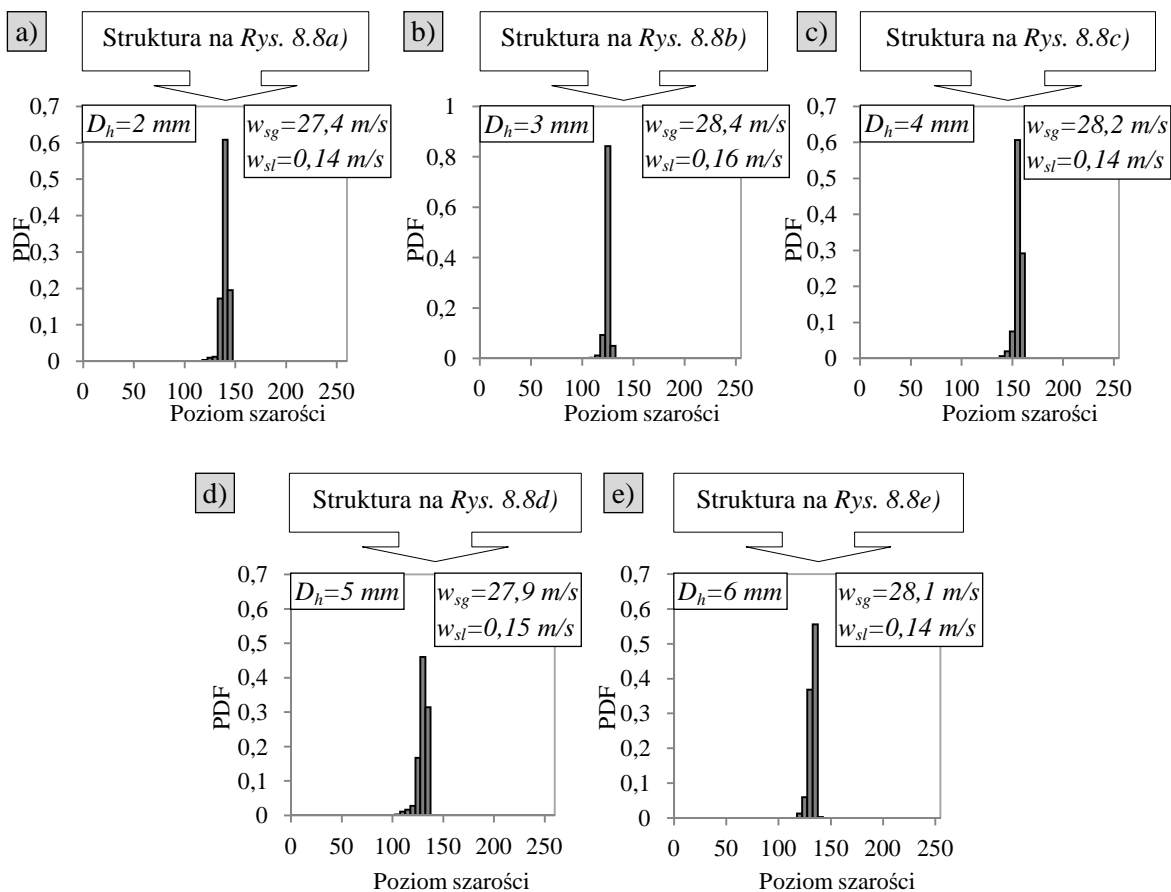
Rys. 8.12. Rozkład funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla struktury pianowo-pierścieniowej (*FA*) w minikanalach: a) $D_h=2$ mm, b) $D_h=3$ mm, c) $D_h=4$ mm, d) $D_h=5$ mm, e) $D_h=6$ mm

Struktura pianowo-pierścieniowa charakteryzuje się pojedynczym prawostronnym maksimum oraz szerokim widmem o nagle narastającym przebiegu (Rys. 8.12). Podczas identyfikacji struktur na podstawie oceny kształtu funkcji PDF istnieje pewna trudność w rozróżnieniu kształtu widma pomiędzy strukturą pianową, pianowo-pierścieniową i pierścieniową. W ich ocenie szczególnie pomocne są wartości takich parametrów statystycznych jak skośności i kurtozy.

Tabela 8.4. Parametry statystyczne przebiegów czasowych dla struktury pianowo-pierścieniowej (FA) w poszczególnych minikanalach (Rys. 8.12)

FA	Średnica hydrauliczna minikanalu D_h [mm]				
	2	3	4	5	6
<i>Prędkości pozorne</i>	$w_{sg}=18,3$ m/s $w_{sl}=0,14$ m/s	$w_{sg}=18,9$ m/s $w_{sl}=0,16$ m/s	$w_{sg}=17,6$ m/s $w_{sl}=0,14$ m/s	$w_{sg}=18,6$ m/s $w_{sl}=0,15$ m/s	$w_{sg}=18,5$ m/s $w_{sl}=0,14$ m/s
Minimum	99	95	60	62	58
Maksimum	141	129	155	133	132
Zakres	42	34	95	71	74
Średnia	137	122	148	127	123
Mediana	138	123	150	130	125
Dominanta	140	123	149	132	125
Odchylenie standardowe	5,03	3,13	8,08	9,30	10,11
Wariancja	25,3	9,77	65,26	86,47	102,19
Skośność	-3,38	-4,08	-4,63	-3,87	-3,34
Kurtoza	14,00	25,48	30,53	17,68	13,00

Spośród trzech wyżej wymienionych struktur w przypadku przepływu pianowo-pierścieniowego kurtoza przyjmuje bardzo wysokie wartości, a także widmo rozkładu funkcji PDF posiada największą lewostronną asymetrię (Tabela 8.4).



Rys. 8.13. Rozkład funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla struktury pierścieniowej (A) w poszczególnych minikanalach

Struktura pierścieniowa charakteryzuje się jednym lokalnym maksimum i stosunkowo wąskim widmem rozkładu (Rys. 8.13).

Tabela 8.5. Parametry statystyczne przebiegów czasowych dla struktury pierścieniowej (A) w poszczególnych minikanalach (Rys. 8.13)

A	Średnica hydrauliczna minikanалу D_h [mm]				
	2	3	4	5	6
Prędkości pozorne	$w_{sg} = 27,4 \text{ m/s}$ $w_{sl} = 0,14 \text{ m/s}$	$w_{sg} = 28,4 \text{ m/s}$ $w_{sl} = 0,16 \text{ m/s}$	$w_{sg} = 28,2 \text{ m/s}$ $w_{sl} = 0,14 \text{ m/s}$	$w_{sg} = 27,9 \text{ m/s}$ $w_{sl} = 0,15 \text{ m/s}$	$w_{sg} = 28,1 \text{ m/s}$ $w_{sl} = 0,14 \text{ m/s}$
Minimum	115	107	137	103	117
Maksimum	141	129	159	133	136
Zakres	26	22	22	30	19
Średnia	137	122	153	127	130
Mediana	138	123	154	128	131
Dominanta	140	123	153	126	132
Odchylenie standardowe	3,24	2,25	3,08	4,60	3,01
Wariancja	10,51	5,07	9,50	21,11	9,08
Skośność	-2,28	-1,93	-1,64	-2,08	-1,25
Kurtoza	9,10	7,85	4,78	6,14	1,90

Za podstawę oceny hydrodynamiki przepływu przyjęto metodę identyfikacji struktur za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa natomiast obserwację wizualną traktowano jako potwierdzenie poprawności otrzymanego wyniku. Porównanie powyższych dwóch sposobów identyfikacji struktur przepływu przedstawiano szczegółowo w kolejnym rozdziale.

8.2. Ocena wpływu średnicy minikanalu na zakresy występowania struktur przepływu

W celu zobrazowania wpływu średnicy hydraulicznej na hydrodynamikę przepływu dwufazowego dla każdej ze średnic opracowano mapę przepływu dla struktur wyznaczonych za pomocą: obserwacji wizualnej i funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla przepływu wznoszącego w każdym minikanale. Otrzymane wyniki zestawiono i przedstawiono w niniejszym rozdziale dokonując analizy porównawczej map.

Dzięki temu, że prędkości obu czynników podczas badań zmieniano w postępie geometrycznym uzyskano równomierne rozłożenie węzłów na przedstawionych mapach, które są zaprezentowane w układzie podwójnie logarytmicznym, gdzie na osi odciętych naniesiono prędkości pozorne gazu, a na osi rzędnych prędkości pozorne cieczy. Natomiast punkt na mapie, którego współrzędne to określone wartości prędkości pozornych gazu i cieczy (w_{sg} i w_{sl}) trzeba rozumieć jako węzeł z przyporządkowaną w postaci symbolu strukturą przepływu.

W tabeli 8.6 umieszczono wprowadzoną systematykę oznaczeń symboli charakteryzujących zaobserwowane i wyznaczone struktury przepływu.

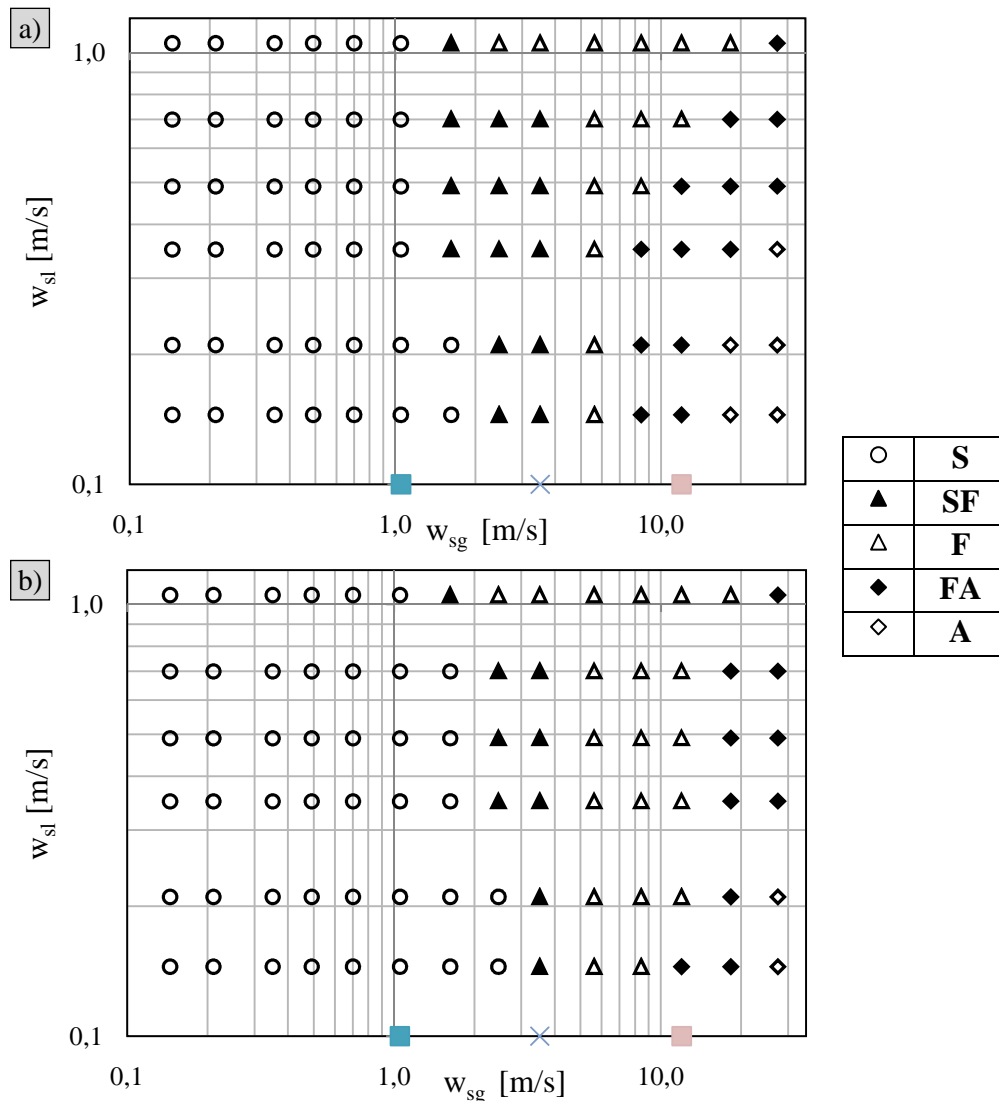
Tabela 8.6. Przyjęte oznaczenia określające rodzaj struktur przepływu

Symbol	Struktura przepływu	
○	S	rzutowa
▲	SF	rzutowo-pianowa
△	F	pianowa
◆	FA	pianowo-pierścieniowa
◇	A	pierścieniowa

W celu porównania zgodności identyfikacji struktur za pomocą obserwacji wizualnej i kształtu funkcji PDF w poszczególnych węzłach, wyznaczono macierze zgodności. Za

miarę zgodności tych dwóch sposobów identyfikacji, przyjęto iloraz sumy otrzymany na głównej przekątnej macierzy odniesionej do łącznej liczby punktów pomiarowych (Tabela 8.7-Tabela 8.11). W sumie wspólnych węzłów dla przepływu w minikanale o $D_h=2$ mm było 70, co w odniesieniu do wszystkich punktów pomiarowych (84) oznacza, że zgodność pomiędzy tymi dwoma metodami identyfikacji wynosiła 83,3 %. Analogicznie postępowano w przypadku pozostałych minikanalów.

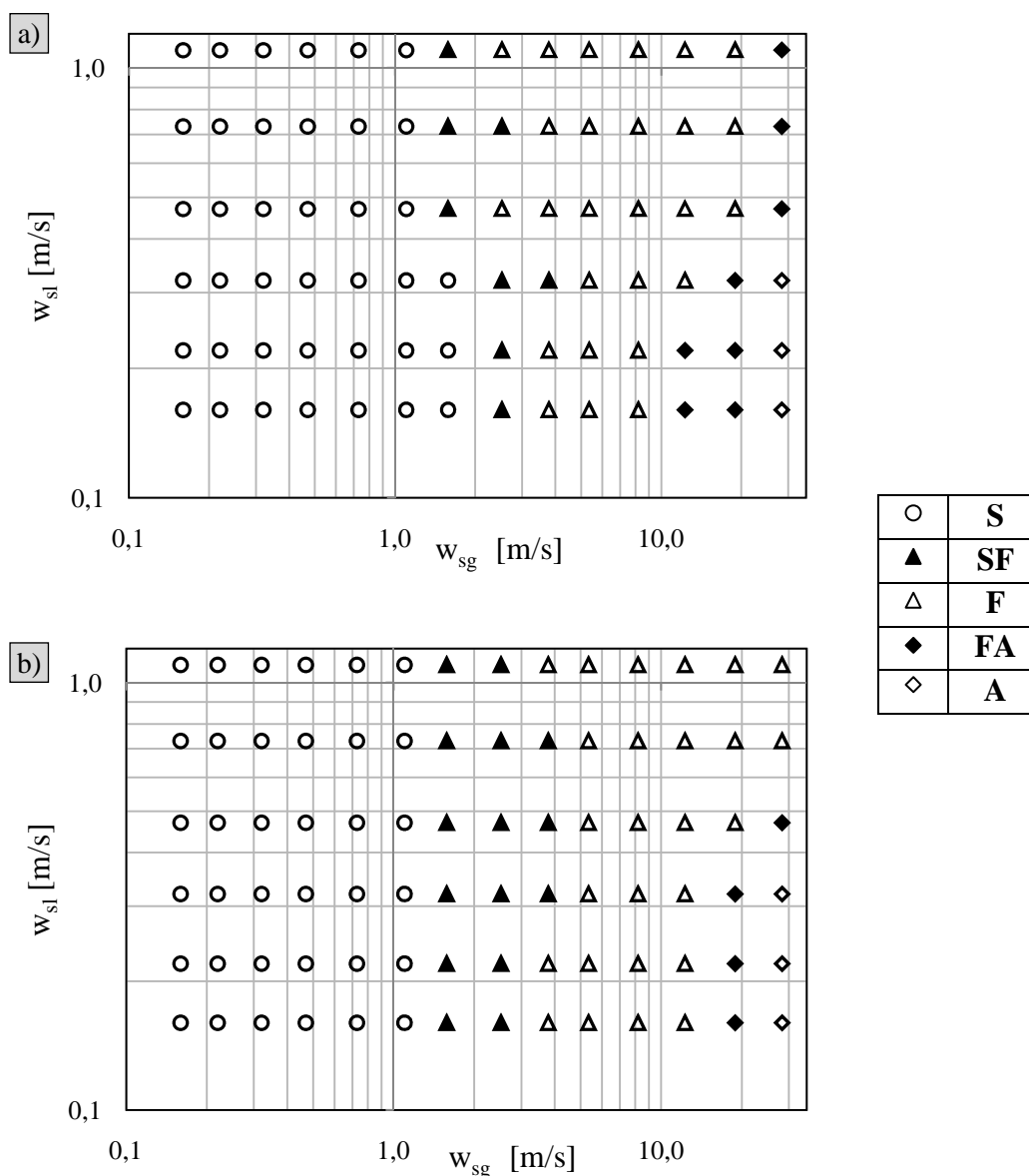
Poniżej zaprezentowano kolejno dla każdego minikanalu mapę wyznaczoną za pomocą obserwacji wizualnej (Rys. 8.14 - Rys. 8.18), następnie mapę wyznaczoną na podstawie analizy funkcji PDF, a kolejno macierze, które prezentują analizę porównawczą tych dwóch sposobów identyfikacji struktur przepływu w minikanalach.



Rys. 8.14. Rozkład struktur przepływu w minikanale o $D_h= 2$ mm wyznaczonych na podstawie: a) obserwacji wizualnej; b) analizy kształtu funkcji gęstości prawdopodobieństwa

Tabela 8.7. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla $D_h=2\text{ mm}$

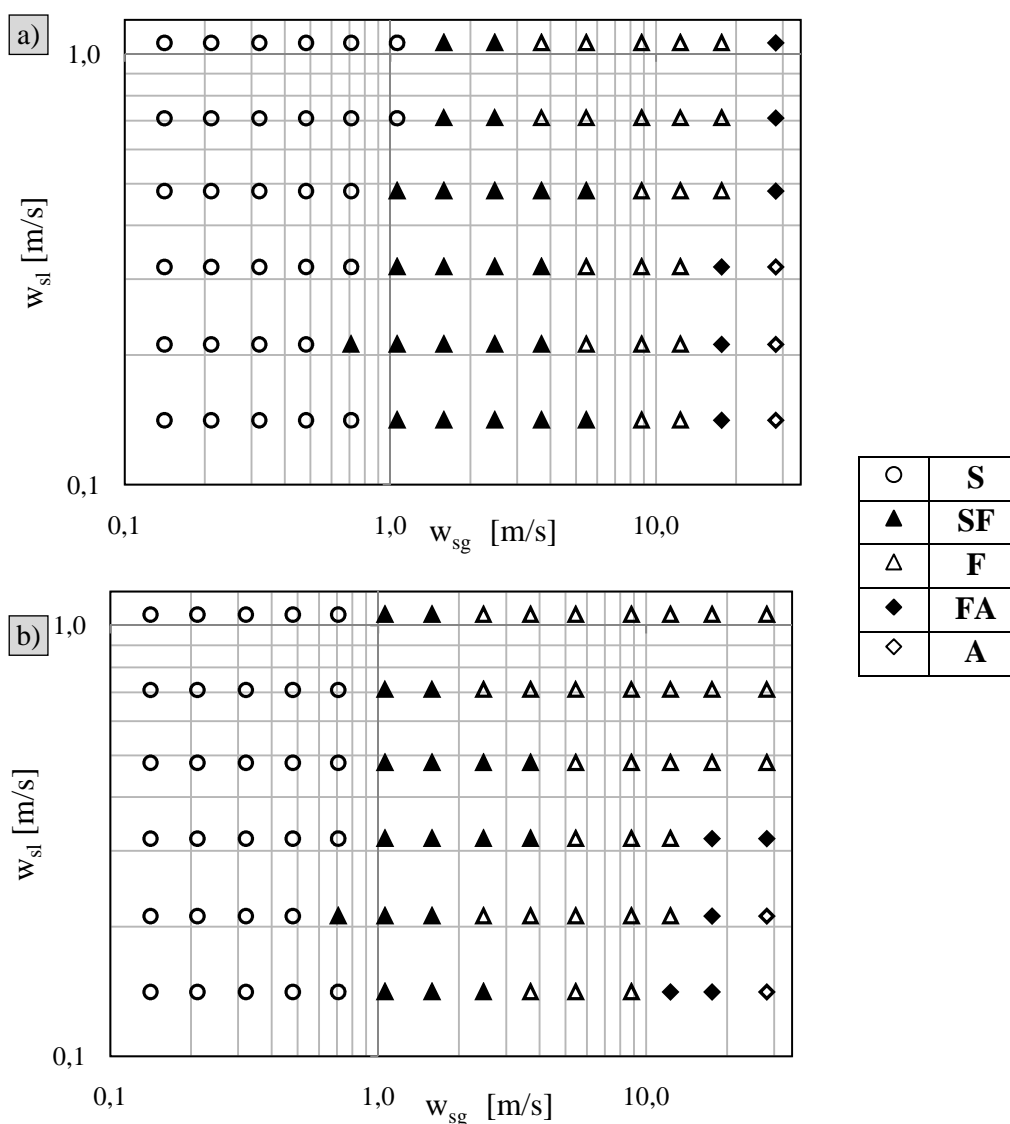
Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą PDF					
		S	SF	F	FA	A	Σ
Struktura obserwowana	S	38	5	0	0	0	43
	SF	0	9	0	0	0	9
	F	0	0	14	6	0	20
	FA	0	0	0	7	3	10
	A	0	0	0	0	2	2
	Σ	38	14	14	13	5	70
Zgodność						83,3 %	



Rys. 8.15. Rozkład struktur przepływu w minikanale o $D_h=3\text{ mm}$ wyznaczonych na podstawie: a) obserwacji wizualnej; b) analizy kształtu funkcji gęstości prawdopodobieństwa

Tabela 8.8. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla $D_h=3\text{ mm}$

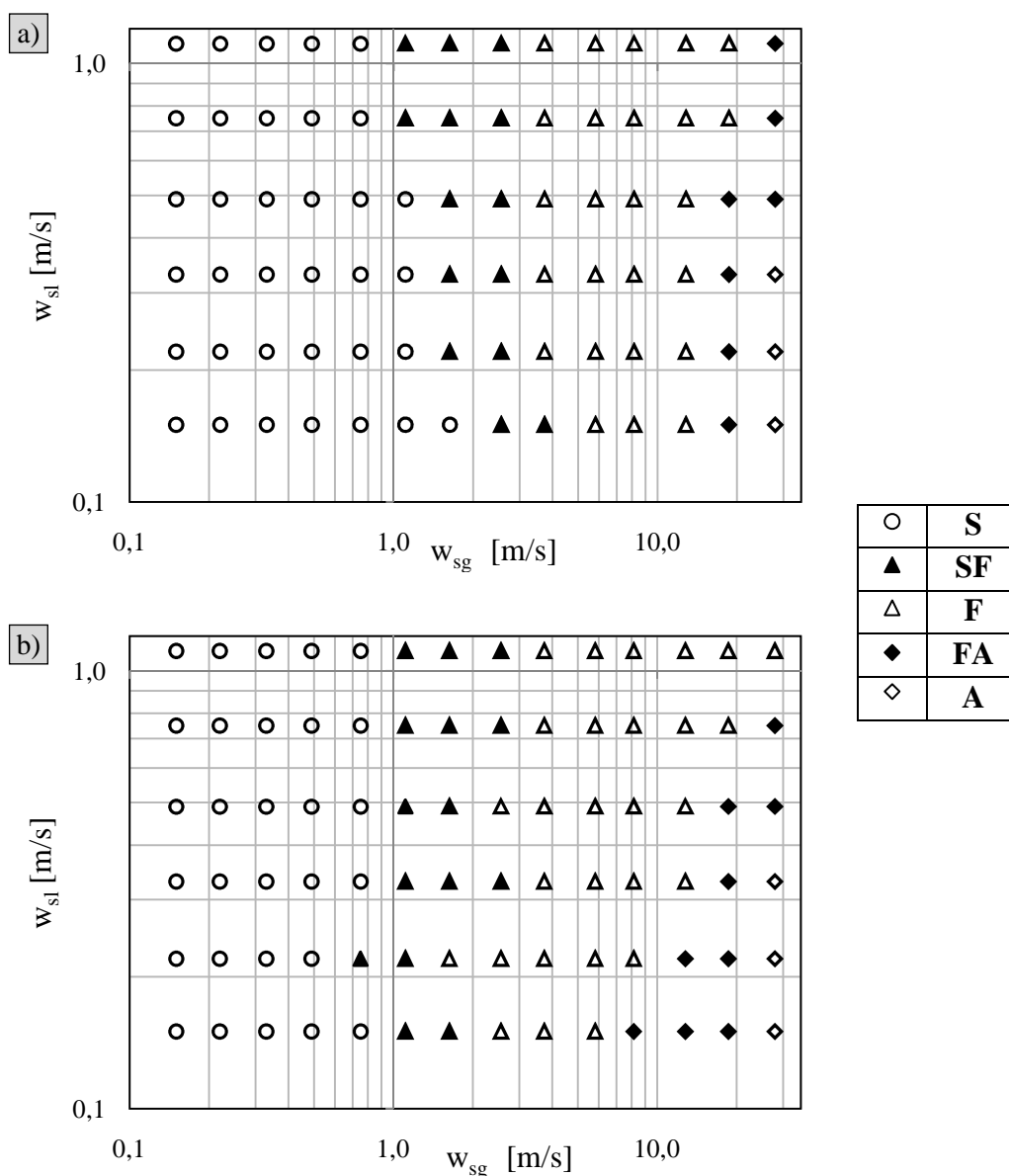
Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą PDF					
		S	SF	F	FA	A	Σ
Struktura obserwowana	S	36	0	0	0	0	36
	SF	3	8	4	0	0	15
	F	0	0	22	4	0	26
	FA	0	0	0	4	0	4
	A	0	0	0	0	3	3
	Σ	39	8	26	8	3	73
Zgodność						86,9 %	



Rys. 8.16. Rozkład struktur przepływu w minikanale o $D_h=4\text{ mm}$ wyznaczonych na podstawie: a) obserwacji wizualnej; b) analizy kształtu funkcji gęstości prawdopodobieństwa

Tabela 8.9. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla $D_h=4$ mm

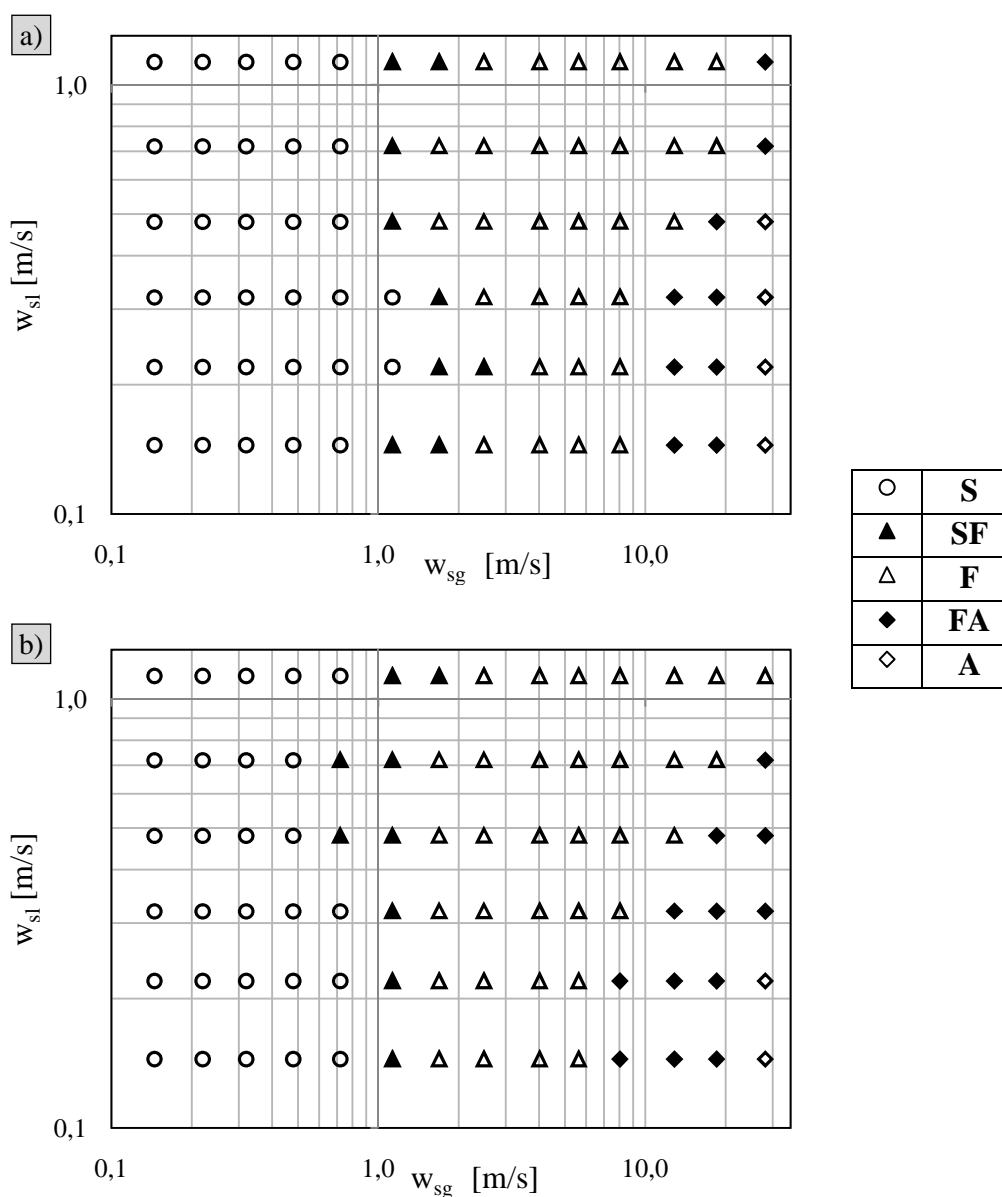
Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą PDF					
		S	SF	F	FA	A	Σ
Struktura obserwowana	S	29	0	0	0	0	29
	SF	2	16	0	0	0	18
	F	0	7	20	3	0	30
	FA	0	0	1	3	1	5
	A	0	0	0	0	2	2
	Σ	31	23	21	6	3	70
Zgodność						83,3 %	



Rys. 8.17. Rozkład struktur przepływu w minikanale o $D_h=5$ mm wyznaczonych na podstawie: a) obserwacji wizualnej; b) analizy kształtu funkcji gęstości prawdopodobieństwa

Tabela 8.10. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla $D_h=5$ mm

Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą PDF					
		S	SF	F	FA	A	Σ
Struktura obserwowana	S	29	0	0	0	0	29
	SF	6	9	0	0	0	15
	F	0	5	22	1	0	28
	FA	0	0	3	6	0	9
	A	0	0	0	0	3	3
	Σ	35	14	25	7	3	69
Zgodność							82,1 %



Rys. 8.18. Rozkład struktur przepływu w minikanale o $D_h=6$ mm wyznaczonych na podstawie: a) obserwacji wizualnej; b) analizy kształtu funkcji gęstości prawdopodobieństwa

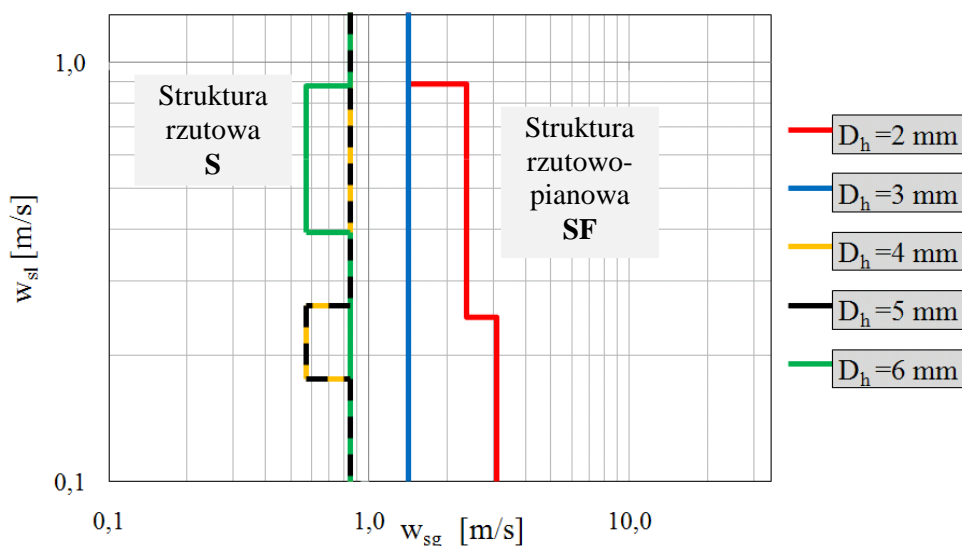
Tabela 8.11. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla $D_h=6$ mm

Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą PDF					
		S	SF	F	FA	A	Σ
Struktura obserwowana	S	28	0	0	0	0	28
	SF	4	5	0	0	0	9
	F	0	4	28	1	0	33
	FA	0	0	2	8	2	12
	A	0	0	0	0	2	2
	Σ	32	9	30	9	4	71
Zgodność						84,5 %	

W tabelach od 8.7 do 8.11 dokonano porównania zgodności pomiędzy dwoma sposobami identyfikacji struktur przepływu, a mianowicie na podstawie obserwacji wizualnej oraz za pomocą funkcji PDF dla wszystkich minikanalów. Przepływ dwufazowy w minikanale o $D_h=3$ mm charakteryzował się najwyższą zgodnością, która wynosiła 86,9 %. Natomiast najniższa zgodność – 82,1 % miała miejsce dla przepływu w minikanale o średnicy $D_h=5$ mm.

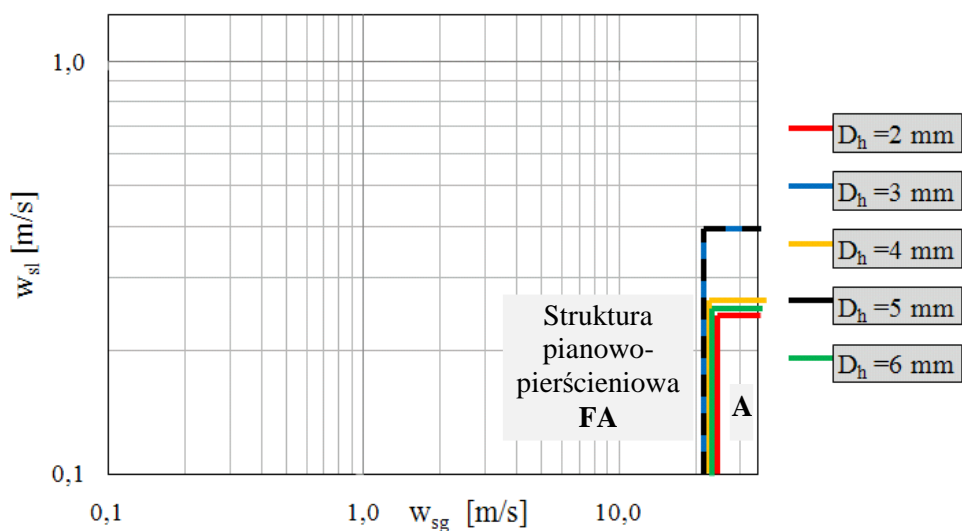
Zasadniczo prezentowane sposoby identyfikacji przepływu osiągają zgodność na bardzo zadowalającym poziomie, wyższym niż 80 %. Często w przypadku obserwacji wizualnej dokładna ocena struktury nie jest możliwa gdyż zmiana koncentracji faz jest zbyt szybka i tylko obserwacja w zwolnionym tempie na to daje szansę. Dlatego też w dalszej dyskusji odnośnie wpływu średnicy minikanalu na zakres powstających struktur przepływu wzięto pod uwagę mapy stworzone na podstawie funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Reasumując, na podstawie przedstawionego porównania tych metod oraz identyfikacji struktur przepływu w poprzednim rozdziale, wnioskuje się, iż metodą oparta na funkcji PDF jest metodą pewniejszą w identyfikacji struktur przepływu

Na wykresie poniżej (Rys. 8.19) naniesiono granice przejścia pomiędzy strukturą rzutową a rzutowo-pianową dla przepływu we wszystkich badanych minikanalach. Porównując zakresy występowania tych struktur w poszczególnych minikanalach można zauważyć, że dla dwóch średnic ($D_h= 4$ i 5 mm) obszar występowania struktury rzutowej jest identyczny. Zgodnie z przedstawionymi granicami można wnioskować, że im mniejsza średnica minikanalu, tym obszar występowania struktury rzutowej jest większy i przesuwa się w kierunku zgodnym ze wzrostem prędkości fazy gazowej. Warto tutaj zauważyć, że tendencja ta jest zgodna z wynikami badań Chen i innych [9], jednak sprzeczna z teoretyczną mapą opracowaną przez Mishima i Ishii [52].

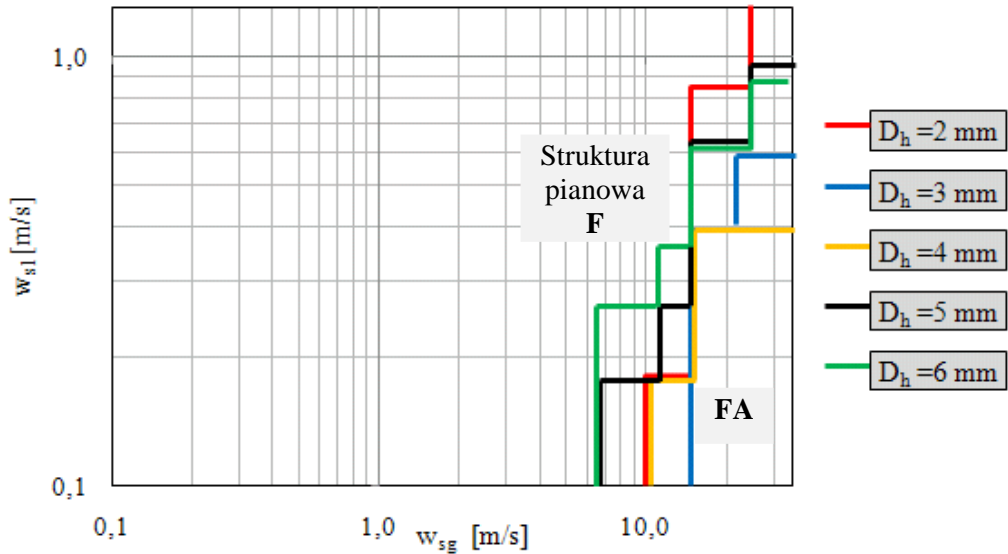


Rys. 8.19. Zakres występowania granicy przejścia między strukturą rzutową (S) a rzutowo-pianową (SF) w zależności od średnicy minikanału

Dla przepływu wznoszącego w minikanalach pojedynczych granice przejścia pomiędzy strukturą pianowo-pierścieniową a pierścieniową w większości pokrywają się (Rys. 8.20). Zatem przeprowadzone badania wykazały, że brak jest wpływu średnicy hydraulicznej minikanału na zakres występowania struktury pierścieniowej. Tendencja ta jest zgodna z rozważaniami Taitela i innych [76].

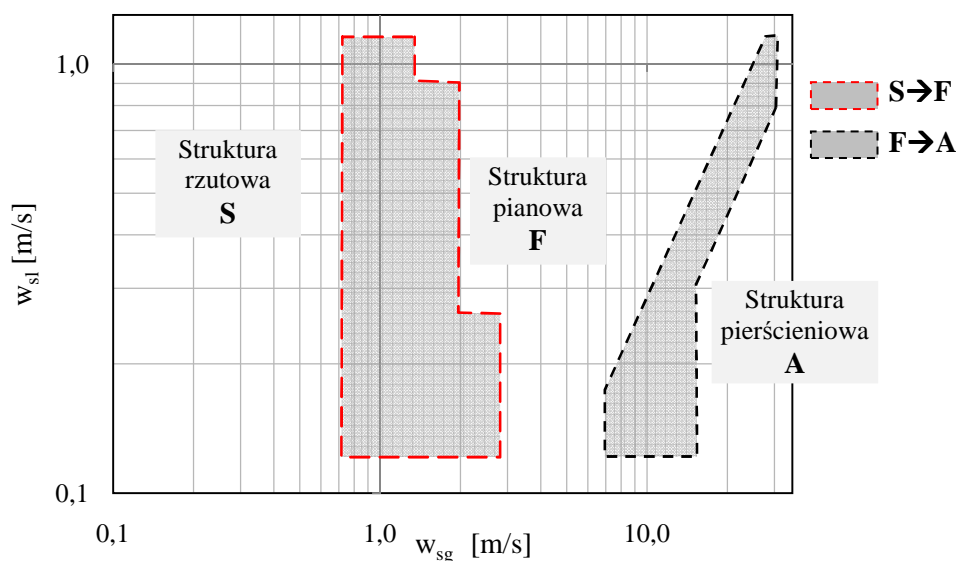


Rys. 8.20. Zakres występowania granicy przejścia między strukturą pianowo-pierścieniową (FA) a pierścieniową (A) w zależności od średnicy minikanału



Rys. 8.21. Zakres występowania granicy przejścia między strukturą pianową (F) a pianowo-pierścieniową (FA) w zależności od średnicy minikanалу

Ze względu na fakt, że w dalszych rozdziałach pracy podjęto porównanie wyników badań własnych z danymi literaturowymi przyjęto założenie, że struktura rzutowo-pianowa SF i pianowa F stanowią jeden obszar jako struktura pianowa F. Podobnie wspólny obszar struktury pianowo-pierścieniowa FA i pierścieniowej A stanowi obszar struktury pierścieniowej A. Na Rys. 8.21 zostały przedstawione linie granic przejścia pomiędzy strukturą pianową F a pianowo-pierścieniową FA. Bazując na liniach granicznych przedstawionych na Rys. 8.19 do Rys. 8.21, zaproponowano mapę z obszarem przejścia pomiędzy strukturą rzutową a pianową a także pomiędzy pianowa a pierścieniową (Rys. 8.22).



Rys. 8.22. Wstępna propozycja mapy dla przepływu wznoszącego w badanych minikanalach

8.3. Porównanie wyników badań własnych z mapą teoretyczną

Przedstawione w niniejszym rozdziale porównanie, ma na celu weryfikację przydatności mapy zaproponowanej przez Taitela i innych [76] dla kanałów konwencjonalnych, do przewidywania struktur przepływu gaz-ciecz w minikanalach. W celu wyznaczenia linii granicznych pomiędzy poszczególnymi strukturami przepływu w równaniach modelu [76] podstawiono wartości parametrów fizycznych wody i powietrza odpowiadające warunkom, w jakich realizowano badania (Tabela 8.12). Wyznaczenie linii granicznych przeprowadzono dla średnic hydraulicznych poszczególnych minikanalów.

Tabela 8.12. Właściwości fizyczne wody i powietrza w temperaturze $t=22^{\circ}\text{C}$ i przy ciśnieniu $p=1,03\text{ bar}$ [75]

Właściwości fizyczne	gęstość [kg/m ³]	lepkość [Pa·s]	napięcie powierzchniowe [N/m]
ciecz	$\rho_l=997,7$	$\eta_l=0,00094$	$\sigma_l=0,073$
gaz	$\rho_g=1,22$	$\eta_g=0,0000181$	

W modelu tej mapy teoretycznej występuje warunek, który dla wszystkich badanych średnic hydraulicznych w warunkach przeprowadzonych badań został spełniony, a mianowicie:

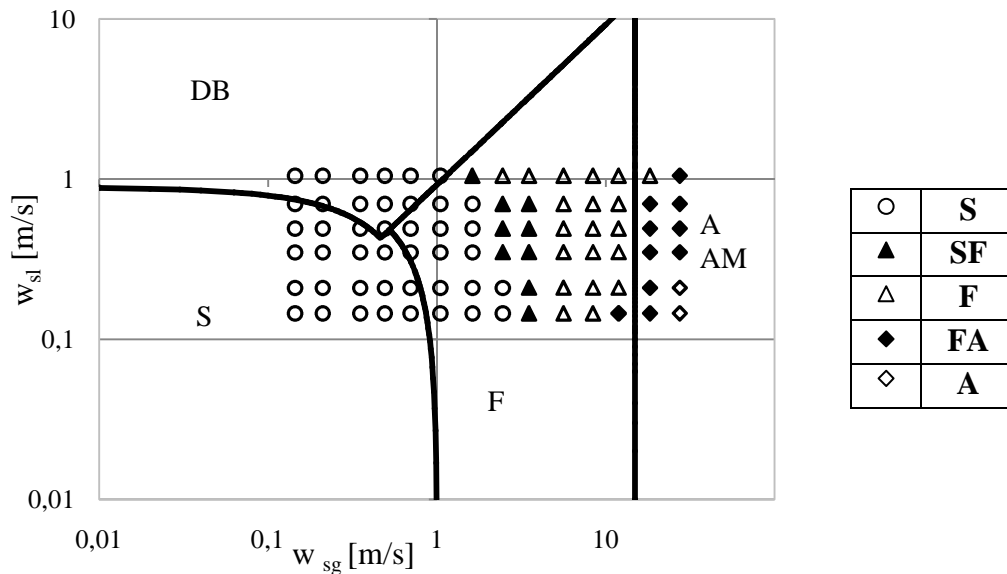
$$\left[\frac{\rho_L^2 g D^2}{(\rho_L - \rho_G) \sigma} \right]^{0,25} \leq 4,36. \quad (8-1)$$

Powyższy warunek oznacza, że według mapy Taitela i innych [76] w przepływie mieszaniny dwufazowej gaz-ciecz dla badanych minikanalów w ogóle nie obserwuje się struktury pęcherzykowej, a w jej miejscu pojawia się struktura rzutowa. Jedynie przy wyższych prędkościach cieczy tworzy się struktura pęcherzykowo-dyspersyjna (DB). Ogólne rzecz ujmując, teoretyczne założenie jest zgodne z przeprowadzonymi badaniami dla określonego zakresu prędkości pozornych faz, gdyż w żadnym przypadku w minikanalach nie zaobserwowano struktury pęcherzykowej. Z drugiej jednak strony, w ogóle nie zaobserwowano struktury pęcherzykowo-dyspersyjnej. Jej brak nie świadczy o tym, iż ta struktura nie występuje w ogóle w minikanalach. Może ona pojawić się dla wartości prędkości pozornych cieczy wyższych niż $w_{sl} > 2\text{m/s}$.

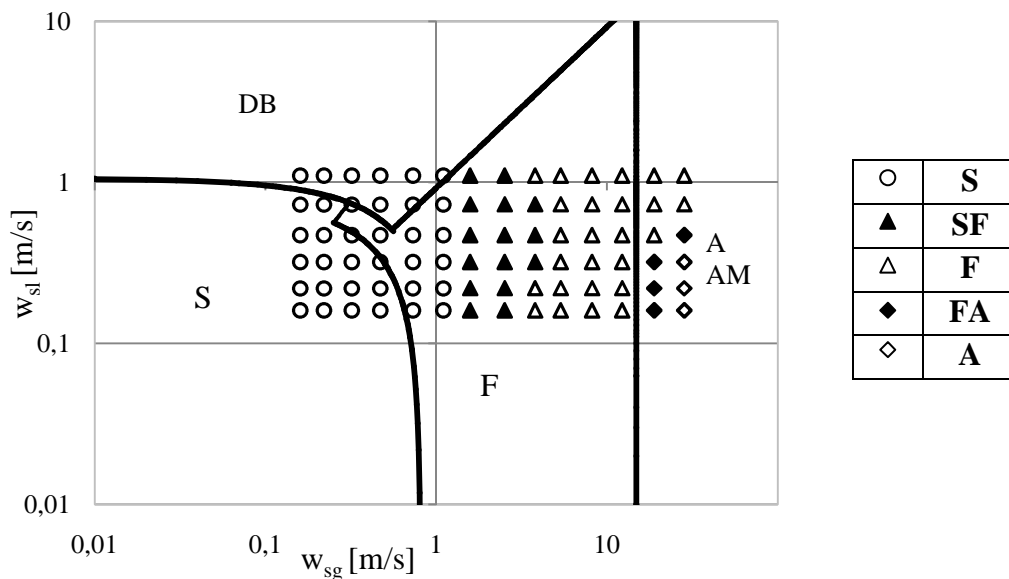
Na mapę teoretyczną naniesiono wyniki badań własnych dla przepływu gaz-ciecz w każdym z minikanalów z osobna. Analizę porównawczą przeprowadzono pod względem

oceny zgodności struktury wyznaczonej za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa i wyznaczonej wg mapy Taitela i innych [76].

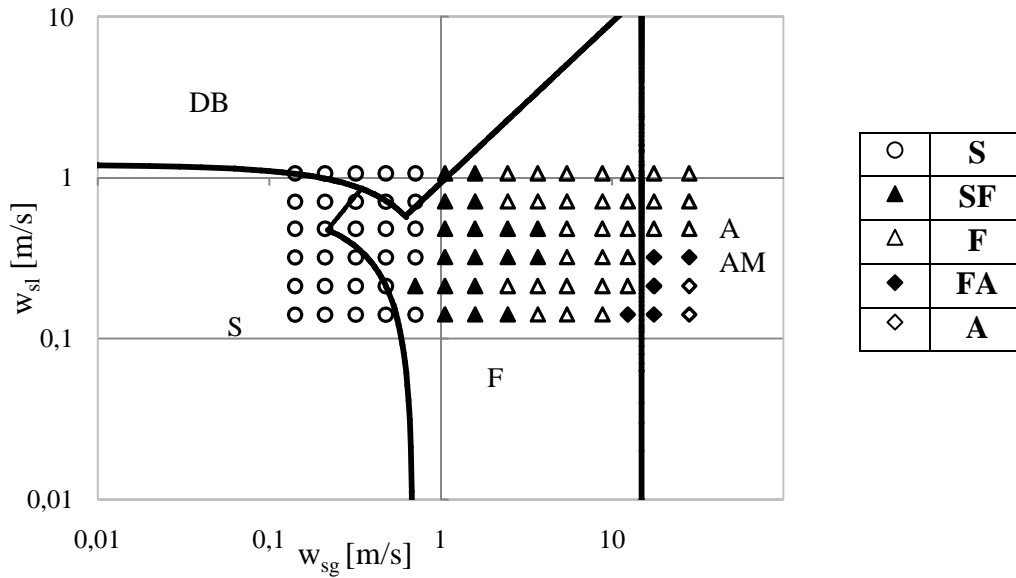
Porównanie to było możliwe przy założeniu, że struktura rzutowo-pianowa SF i pianowa F stanowią jeden obszar jako struktura pianowa F. Podobnie wspólny obszar struktury pianowo-pierścieniowa FA i pierścieniowej A stanowi obszar struktury pierścieniowej A. Dla średnic hydraulicznych minikanatów 2, 3, 4, 5 i 6 mm stosunek L/D_h wynosił odpowiednio 301, 202, 151, 123 i 102.



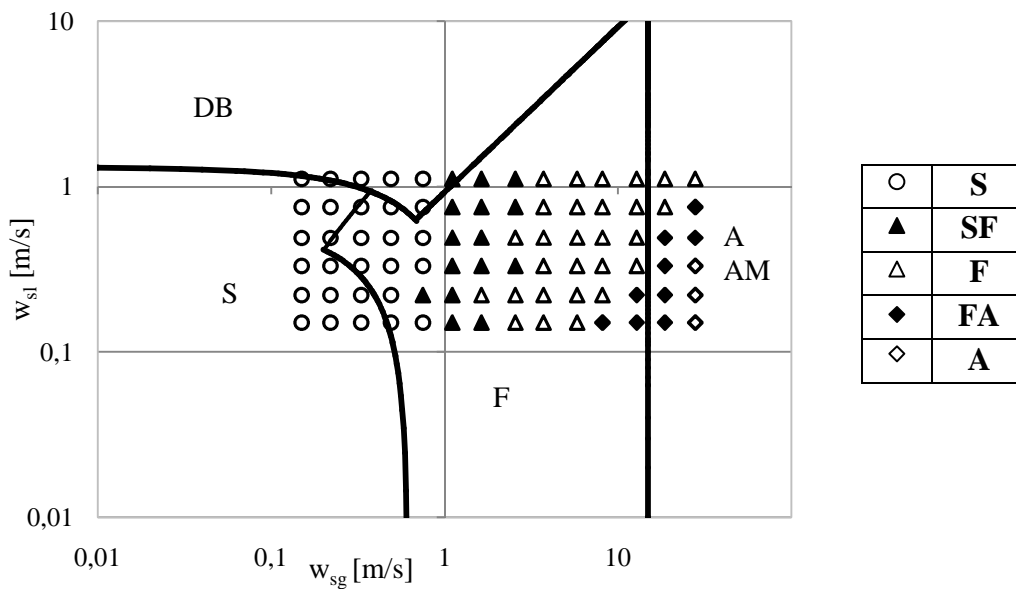
Rys. 8.23. Porównanie wyników badań własnych z mapą zaprezentowaną wg Taitela i innych [76] dla przepływu w minikanale o $D_h=2$ mm



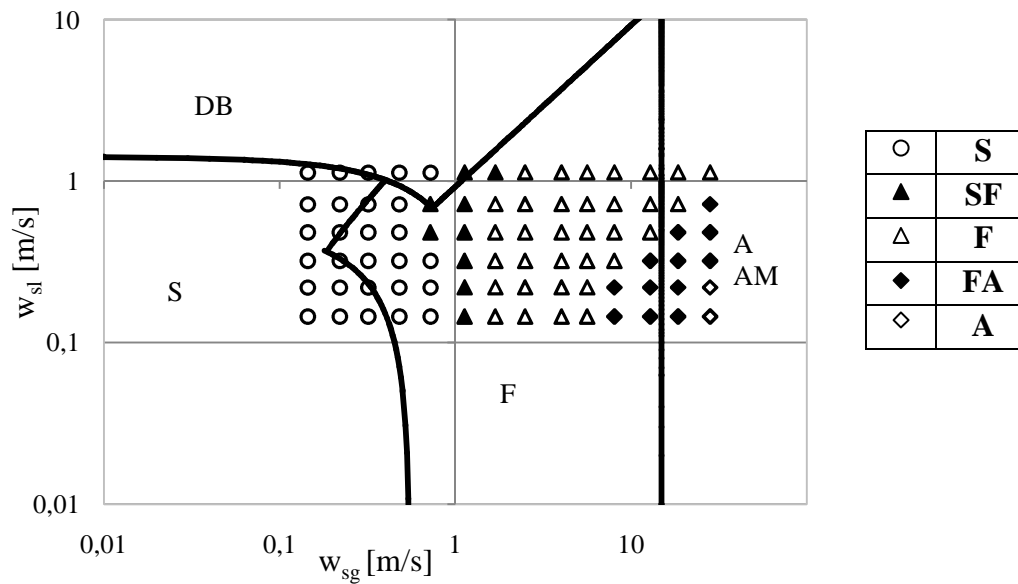
Rys. 8.24. Porównanie wyników badań własnych z mapą zaprezentowaną wg Taitela i innych [76] dla przepływu w minikanale o $D_h=3$ mm



Rys. 8.25. Porównanie wyników badań własnych z mapą zaprezentowaną wg Taitela i innych [76] dla przepływu w minikanale o $D_h=4$ mm



Rys. 8.26. Porównanie wyników badań własnych z mapą zaprezentowaną wg Taitela i innych [76] dla przepływu w minikanale o $D_h=5$ mm



Rys. 8.27. Porównanie wyników badań własnych z mapą zaprezentowaną wg Taitela i innych [76] dla przepływu w minikanale o $D_h=6$ mm

Analiza porównawcza wyników badań własnych z mapą Taitela i innych [76] została zestawiona w tabelach od 8.13 do 8.17. Wynik analizy może wywoływać pewne zaskoczenie, dlatego że korzystając z mapy przepływu opracowanej dla przepływu w kanałach konwencjonalnych, otrzymuje się stosunkowo dobrą zgodność ze strukturami wyznaczonymi za pomocą funkcji PDF dla przepływu dwufazowego w minikanalach, a mianowicie, zgodnie z McQuillan’em [48], który za zadawalający wynik uznaje zgodność na poziomie 70%.

Tabela 8.13. Analiza porównawcza struktur wyznaczonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa i określonych wg mapy Taitela i innych dla $D_h=2$ mm

Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą PDF (badania własne)				
		DB	S	SF+F	FA+A	Σ
Struktura wyznaczona wg Taitela i innych [76]	DB	0	11	0	0	11
	S	0	18	0	0	18
	F	0	14	28	1	43
	A	0	0	1	11	12
	Σ	0	43	29	12	57
Zgodność					67,8 %	

Tabela 8.14. Analiza porównawcza struktur wyznaczonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa i określonych wg mapy Taitela i innych dla $D_h=3$ mm

Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą PDF (badania własne)				
		DB	S	SF+F	FA+A	Σ
Struktura wyznaczona wg Taitela i innych [76]	DB	0	9	0	0	9
	S	0	17	0	0	17
	F	0	10	36	0	46
	A	0	0	5	7	12
	Σ	0	36	41	7	60
Zgodność					71,4 %	

Tabela 8.15. Analiza porównawcza struktur wyznaczonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa i określonych wg mapy Taitela i innych dla $D_h=4$ mm

Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą PDF (badania własne)				
		DB	S	SF+F	FA+A	Σ
Struktura wyznaczona wg Taitela i innych [76]	DB	0	6	1	0	7
	S	0	14	0	0	14
	F	0	9	41	1	51
	A	0	0	6	6	12
	Σ	0	29	48	7	61
Zgodność					72,6 %	

Tabela 8.16. Analiza porównawcza struktur wyznaczonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa i określonych wg mapy Taitela i innych dla $D_h=5$ mm

Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą PDF (badania własne)				
		DB	S	SF+F	FA+A	Σ
Struktura wyznaczona wg Taitela i innych [76]	DB	0	5	1	0	6
	S	0	13	0	0	13
	F	0	11	39	3	53
	A	0	0	3	9	12
	Σ	0	29	43	12	61
Zgodność					72,6 %	

Tabela 8.17. Analiza porównawcza struktur wyznaczonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa i określonych wg mapy Taitela i innych dla $D_h=6$ mm

Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą PDF (badania własne)				
		DB	S	SF+F	FA+A	Σ
Struktura wyznaczona wg Taitela i innych [76]	DB	0	3	2	0	5
	S	0	14	0	0	14
	F	0	11	37	5	55
	A	0	0	3	9	12
	Σ	0	28	42	14	60
Zgodność					71,4 %	







Najmniejszą zgodność zaobserwowano dla przepływu w minikanale o średnicy hydraulicznej równej 2 mm (67,8%). W pozostałych czterech minikanalach przeprowadzona analiza wykazała zgodność powyżej 70 %. Taki wynik, choć nieco zaskakujący, pozwala wysunąć wniosek, iż opracowany przez Taitela i innych [76] model teoretyczny umożliwia określenie zakresów występowania struktur przepływu dwufazowego także w minikanalach. Jednakże trzeba tutaj dodać, że w przypadku określenia samej granicy przejścia pomiędzy strukturą rzutową a pianową, linie graniczne wyznaczone za pomocą mapy w znacznym stopniu odbiegają od wyników badań własnych. Natomiast przejście pomiędzy strukturą pianową i pierścieniową zarówno w modelu teoretycznym jak i w przeprowadzonych badaniach występuje w podobnym poziomie prędkości pozornych gazu. Ponadto Taitel i inni [76] zakładają, że zmiana struktury pianowej w pierścieniową nie zależy od średnicy kanału, co jest zgodne z przeprowadzonymi badaniami własnymi. Warto również tutaj dodać, że badacze z tej samej grupy (Barnea i inni [5]) przeprowadzili badania w kanałach okrągłych o średnicy od 4 do 12 mm, w których dwie średnice według przyjętego podziału należą do minikanalów (4 i 6 mm). Badania te również wykazały dobrą zgodność pomiędzy modelem teoretycznym a przeprowadzonymi badaniami eksperymentalnymi. Dla pełnego potwierdzenia, postanowiono podjąć analizę porównawczą badań własnych z dostępnymi w literaturze badaniami eksperymentalnymi, w celu opracowania dla przepływu w minikanalach mapy, która określałaby struktury z większą dokładnością. Analizę taką przedstawiono w kolejnym rozdziale.

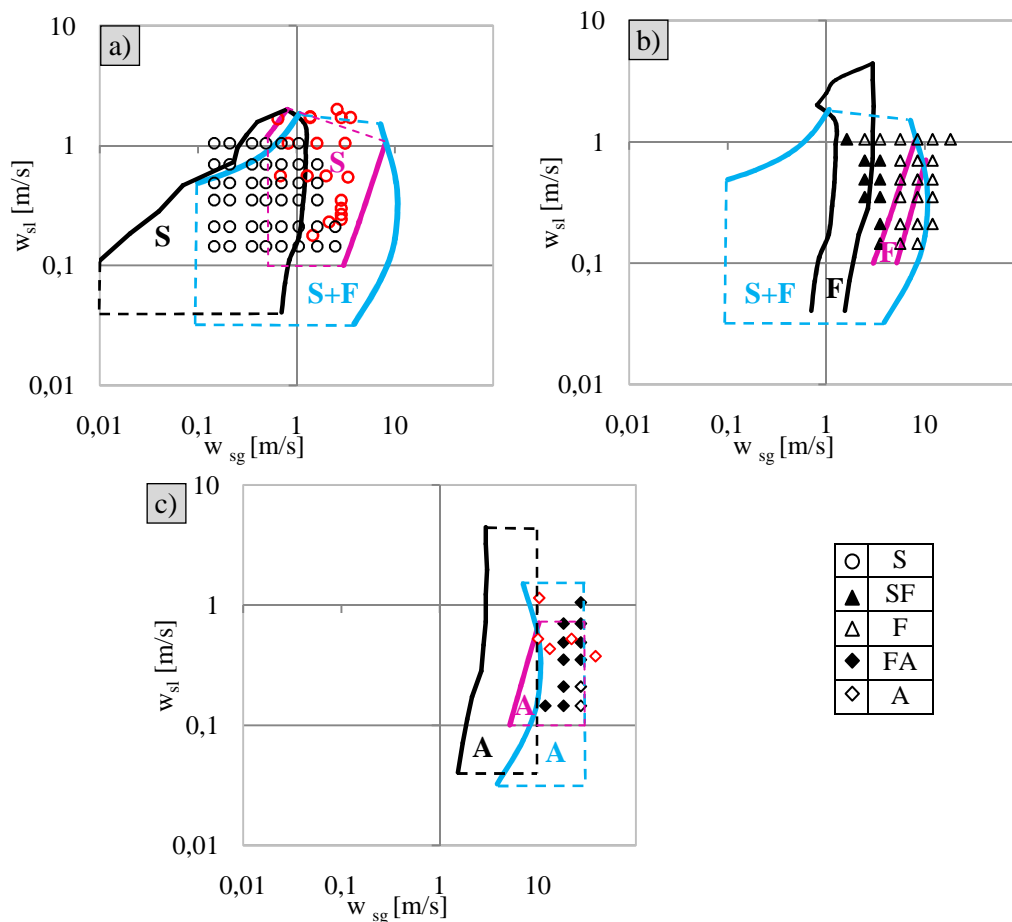
Zdecydowano także podjąć próbę porównania z mapą Troniewskiego i Ulbricha [80],[83], jednak z uwagi, że badania dotyczą przepływu wody i powietrza, efekt uwzględniający zamiast prędkości pozornych faz pierwiastki z gęstości faz nie mógł być wyeksponowany.

8.4. Porównanie wyników badań własnych z danymi obcymi

Dysponując wynikami badań własnych, które zostały przedstawione w poprzednim rozdziale, postanowiono porównać je z innymi badaniami cytowanymi w literaturze. Analizie poddano wyniki struktur przepływu określonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa a także proponowanej mapy własnej. Dla przepływu w każdym minikanale oddzielnie porównano zakresy występowania poszczególnych struktur z danymi literaturowymi. Następnie, bazując na mapach przepływu innych badaczy (przedstawionych w tabeli 8.18, tabeli 8.20, tabeli 8.22, tabeli 8.24), dokonano analizy statystycznej dla przepływu w każdym minikanale oddzielnie. Ze względu na to, że mapy przepływu, na podstawie których wyznaczono strukturę przepływu, mają ograniczony obszar ważności, wprowadzono oznaczenie UN, jako struktura niesklasyfikowana w sytuacji gdy badania własne były poza porównywanymi obszarami danych literaturowych.

Tabela 8.18. Baza danych do porównania z przepływem w minikanale o $D_h=2\text{ mm}$

	Chen i inni [9]	Mishima i Hibiki [51]	Fukano i Kariyasaki [21]	Ide i inni [30]	
Oznaczenie		 B  S  A 28 punktów			
D_h [mm]	2,01	2,05	2,4	2,0	
Przekrój minikanalu	okrągły				
Czynnik roboczy	R134a	powietrze/woda	powietrze/woda	powietrze/woda	
Ciśnienie [MPa]	0,6	0,1	0,1	0,15	
Temperatura [°C]	20–55	20	20	18–24	
Struktury przepływu	DB, B, S, F, A	B, S, A	B, I, A	B, S, F, A	
Prędkość pozorna [m/s]	gazu	0,01–10,0	0,1–50	0,1–30,0	0,5–30,0
	cieczy	0,04–5,0	0,02–2	0,03–2,0	0,1–2,0

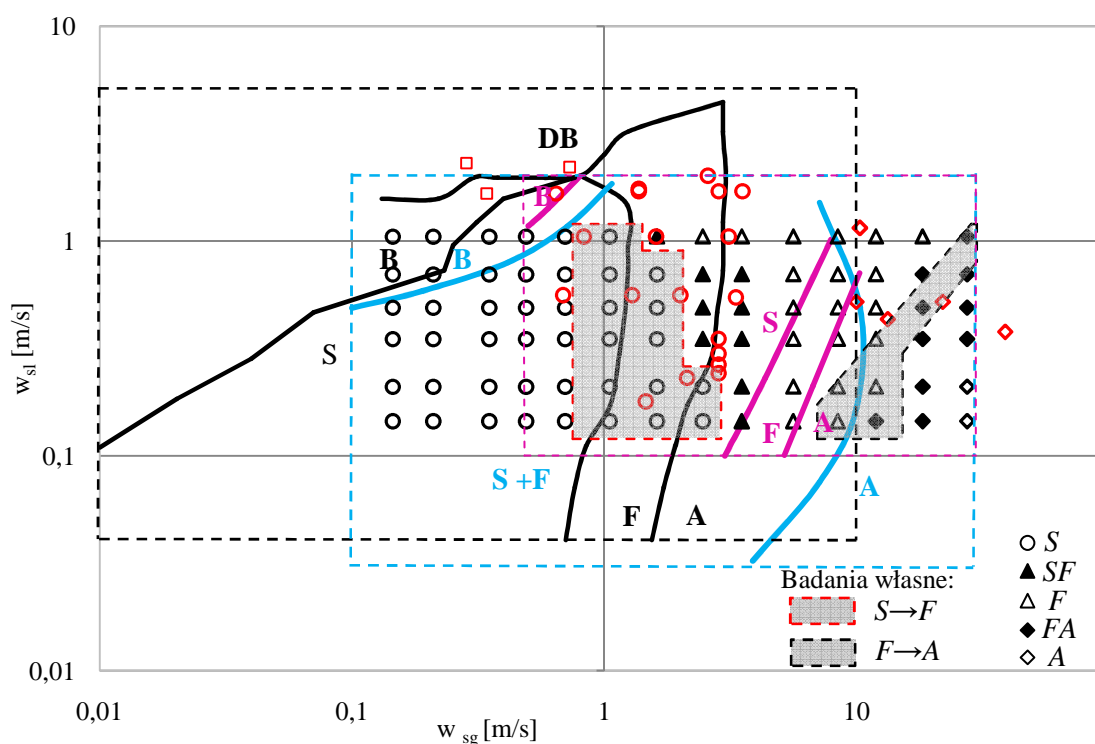


Rys. 8.28. Porównanie obszarów występowania przepływu w minikanale o $D_h=2$ mm z wynikami eksperymentalnymi własnymi oraz zebranymi w tabeli 8.18 dla: a) struktury rzutowej S; b) struktur pianowych: SF+F; c) struktur pierścieniowych: FA+A

Na Rys. 8.28 dokonano porównania zakresów występowania poszczególnych struktur dla wyżej wymienionych map przepływu z wynikami badań własnych dla przepływu w minikanale o średnicy hydraulicznej 2 mm. Przedstawiona graficzna analiza porównawcza pozwoliła określić części wspólne zakresów występowania poszczególnych struktur. W przypadku struktury rzutowej jest to wąski obszar który jest określony przez początkowy zakres mapy Ide i innych [30], górny przez granicę mapy wg Fukano i Kariyasaki [21], a maksymalny przez granice zaproponowaną przez Chena i innych [9]. Można również zaobserwować dużą zgodność pomiędzy obszarem struktury rzutowej wyznaczonej przez mapę Fukano i Kariyasaki [21] z danymi Mishimy i Hibiki [51]. Natomiast dla przykładu struktury pianowej i pierścieniowej dla analizowanych map nie

odnotowano części wspólnej zakresu ich występowania. Zaobserwowano jednakże wysoką zgodność zakresu struktury pierścieniowej wyznaczonej wg mapy Fukano i Kariyasaki [21] wynikami badań własnych i Mishimy i Hibiki [51].

Z kolei na Rys. 8.29 przedstawiono własne dane oraz punkty eksperymentalne Mishimy i Hibiki [51] na tle map przepływu wg autorów przedstawionych w tabeli 8.18 a także mapy własnej. Wszystkie spośród zaproponowanych przez badaczy mapy wyznaczone zostały na drodze eksperymentalnej.



Rys. 8.29. Porównanie wyników badań własnych w minikanale o $D_h=2\text{ mm}$ z danymi literaturowymi zebranymi w tabeli 8.18

Na podstawie wyników przedstawionych w tabeli 8.19, można zaobserwować, iż ogólna statystyczna zgodność pomiędzy strukturami wyznaczonymi w badaniach własnych, a określonymi z pomocą mapy Chena i innych [9] oraz Ide i innych [30] wynosiła w obydwu przypadkach 42,8 %. Przy czym jednym z powodów tak niskiej zgodności dla pierwszej wspomnianej mapy, jest w porównaniu z przeprowadzonymi badaniami własnymi, niższy zakres prędkości fazy gazowej. O wiele lepszy rezultat uzyskano z porównania z mapą Fukano i Kariyasaki [21] – 84,5 %. Ta wysoce zadowalająca zgodność wynika z tego, iż autorzy przedstawili na swej mapie wspólny obszar dla struktury rzutowej S i pianowej F, noszący miano przepływu przejściowego I.

Tabela 8.19. Analiza porównawcza struktur wyznaczonych za pomocą PDF dla przepływu w minikanale o $D_h=2$ mm oraz określonych wg mapy przepływu
a) Chena i innych [9]; b) Fukano i Kariyasaki [21]; c) Ide i innych [30]



a)		Liczba punktów	Struktura wyznaczona za pomocą PDF (badania własne)			
			DB+B	S	SF+F	FA+A
Struktura wyznaczona wg Chena i innych [9]	DB+B	0	4	0	0	4
	S	0	31	0	0	31
	F	0	6	5	0	11
	A	0	2	18	0	20
	UN	0	0	6	12	18
	Σ	0	43	29	12	36
Zgodność					42,8 %	

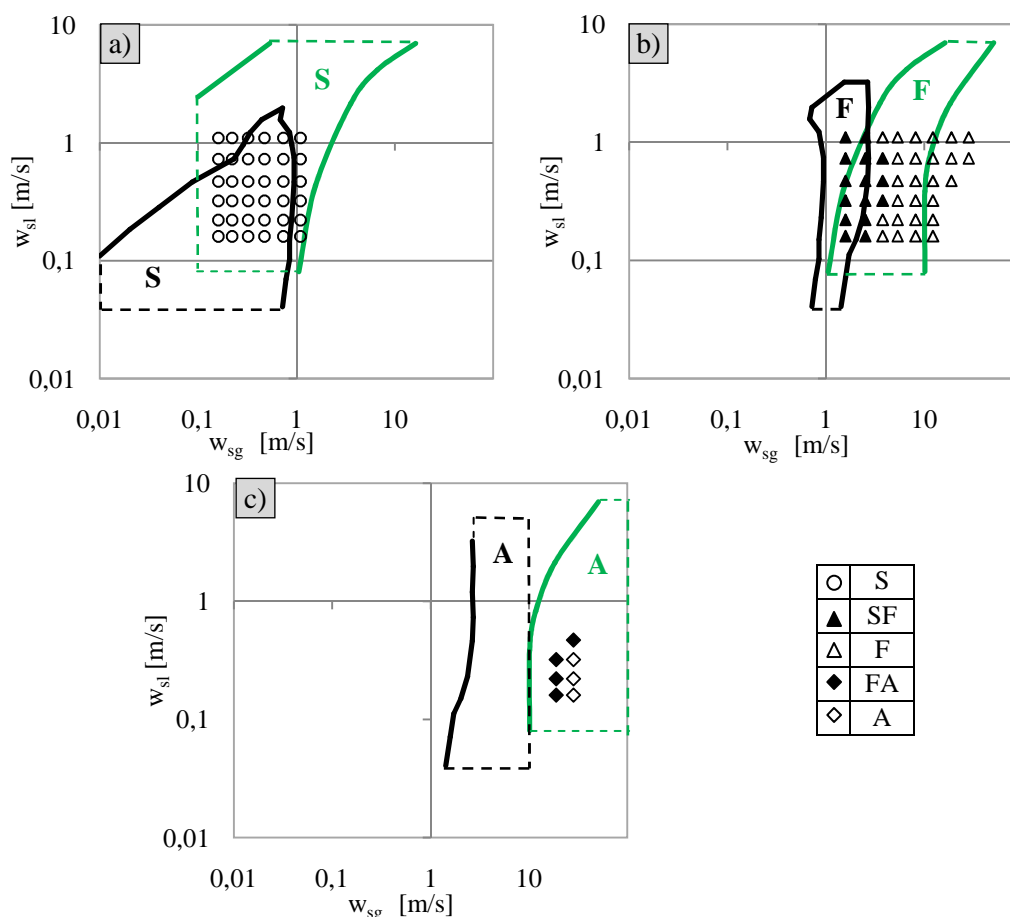
b)		Liczba punktów	Struktura wyznaczona za pomocą PDF (badania własne)			
			B	S+SF+F	FA+A	Σ
Struktura wyznaczona wg Fukano i Kariyasaki [21]	B	0	6	0	6	
	S+F	0	59	0	59	
	A	0	7	12	19	
	Σ	0	67	12	71	
Zgodność					84,5 %	

c)		Liczba punktów	Struktura wyznaczona za pomocą PDF (badania własne)			
			B	S	SF+F	FA+A
Struktura wyznaczona wg Ide i innych [30]	B	0	0	0	0	0
	S	0	19	14	0	33
	F	0	0	6	0	6
	A	0	0	7	11	18
	UN	0	24	2	1	27
	Σ	0	43	29	12	36
Zgodność					42,8 %	

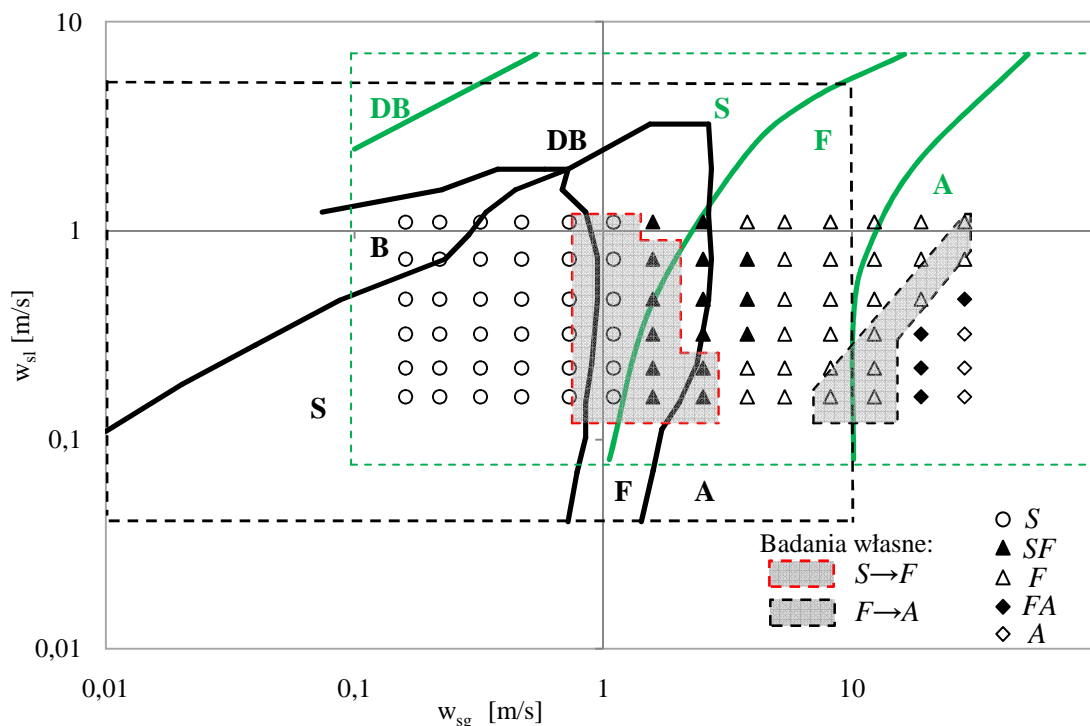
Kolejno na Rys. 8.30 przedstawiono porównanie wyników badań własnych w minikanale o $D_h=3$ mm z obszarami występowania poszczególnych struktur przepływu według map przedstawionych w tabeli 8.20.

Tabela 8.20. Baza danych do porównania z przepływem w minikanale o $D_h=3$ mm

	Chen i inni [9]	Zhao i Bi [100]
Oznaczenie		
D_h [mm]	2,88	2,886
Przekrój minikanalu	okrągły	trójkątny
Czynnik roboczy	R134a	powietrze/woda
Ciśnienie [MPa]	0,6	0,1
Temperatura [°C]	20–55	22
Struktury przepływu	DB, B, S, F, A	B, S, F, A
Prędkość pozorna [m/s]	gazu	0,01–10,0
	cieczy	0,04–5,0



Rys. 8.30. Porównanie obszarów występowania przepływu w minikanale o $D_h=3$ mm z wynikami eksperymentalnymi własnymi oraz zebranymi w tabeli 8.20 dla: a) struktur rzutowej S; b) struktur pianowych: SF+F; c) struktur pierścieniowych: FA+A



Rys. 8.31. Porównanie wyników badań własnych w minikanale o $D_h=3$ mm z danymi literaturowymi zebranymi w tabeli 8.20

Tabela 8.21. Analiza porównawcza struktur wyznaczonych za pomocą PDF dla przepływu w minikanale o $D_h=3$ mm oraz określonych wg mapy przepływu a) Chena i innych [9]; b) Zhao i Bi [100]



a)		Struktura wyznaczona za pomocą PDF (badania własne)				
Liczba punktów		DB+B	S	SF+F	FA+A	Σ
Struktura wyznaczona wg Chena i innych [9]	DB+B	0	5	0	0	5
	S	0	25	3	0	28
	F	0	6	9	0	15
	A	0	0	21	0	21
	UN	0	0	11	7	18
	Σ	0	36	41	7	34
Zgodność					40,4 %	

b)		Struktura wyznaczona za pomocą PDF (badania własne)				
Liczba punktów		DB	S	SF+F	FA+A	Σ
Struktura wyznaczona wg Zhao i Bi [100]	DB	0	0	0	0	0
	S	0	36	3	0	39
	F	0	0	28	0	28
	A	0	0	10	7	17
	Σ	0	36	41	7	71
Zgodność					84,5 %	

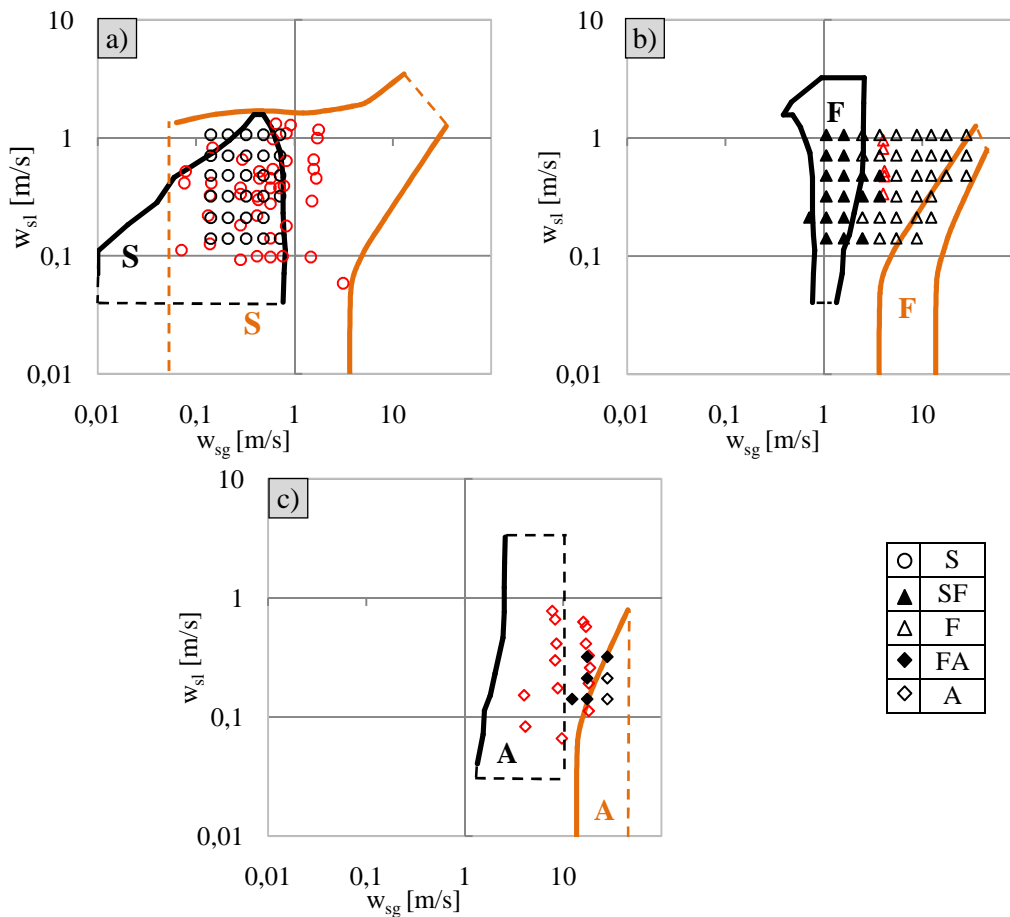
Na Rys. 8.31 na tle mapy Chena i innych [9], mapy Zhao i Bi [100] oraz mapy własnej przedstawiono wyniki badań własnych dla przepływu w minikanale o $D_h=3$ mm. Analiza porównawcza przedstawiona w tabeli 8.21 wykazała wysoką zgodność (84,5%) pomiędzy wynikami badań własnych a mapą wyznaczoną eksperymentalnie przez Zhao i Bi [100]. O wiele gorsze wyniki analizy zanotowano w porównaniu z mapą Chena i innych [9] (40,4%). W obszarze zmiany struktury rzutowej w pianową zaproponowanej wg badań własnych przebiegają zarówno granica wg Chena i innych [9] jak i Zhao i Bi [100]. Jednakże dla struktur przepływu w minikanale o średnicy hydraulicznej 3 mm linia graniczna wg Zhao i Bi [100] wyznacza z większą dokładnością strukturę rzutową. Natomiast granice przejścia pomiędzy strukturą pianową a pierścieniową zaproponowane przez wyżej wymienionych autorów odbiegają od zaproponowanego w badaniach własnych zakresu zmian tych struktur, szczególnie widoczne jest dla badań przeprowadzonych przez Chena i innych [9].

Następnie poddano analizie wyniki badań własnych dla przepływu w minikanale o średnicy $D_h=4$ mm porównując je z danymi literaturowymi zebranymi w tabeli 8.22.

Tabela 8.22. Baza danych do porównania z przepływem w minikanale o $D_h=4$ mm

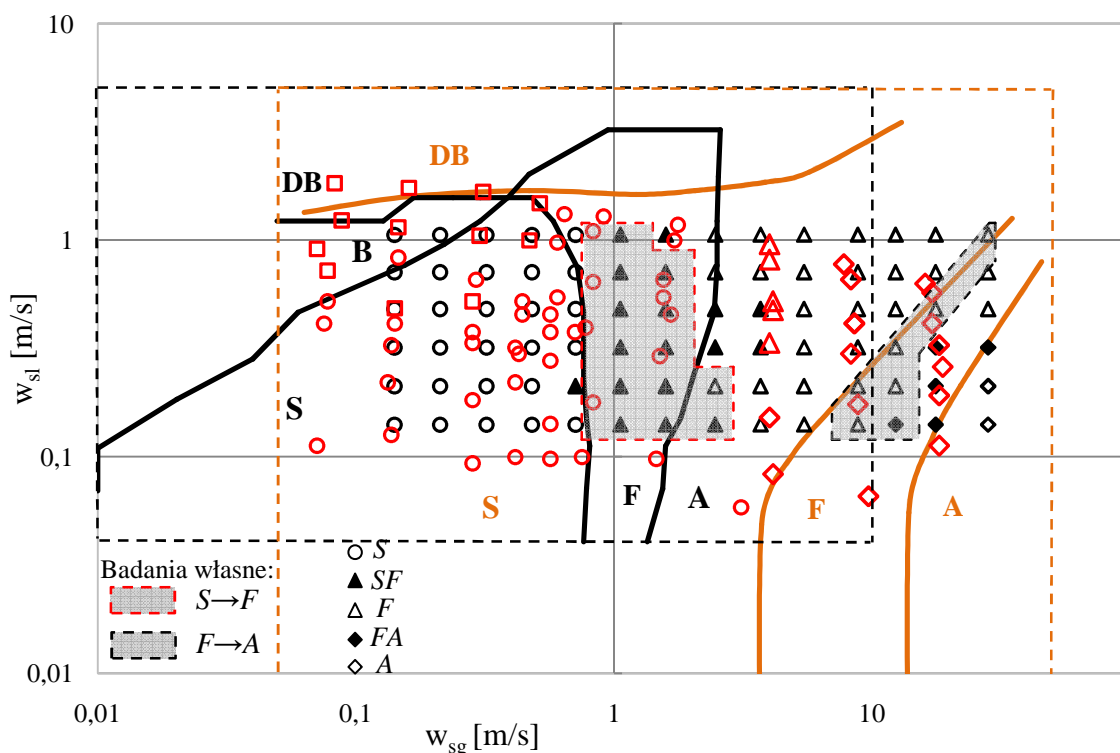
	Chen i inni [9]	Mishima i Hibiki [51]	Barnea i inni [5]
Oznaczenie		□ B ○ S △ F ◇ A 75 punktów	
D_h [mm]	4,26	4,08	4,0
Przekrój minikanalu	okrągły		
Czynnik roboczy	R134a	powietrze/woda	powietrze/woda
Ciśnienie [MPa]	0,6	0,1	0,1
Temperatura [°C]	20–55	20	25
Struktury przepływu	DB, B, S, F, A	B, S, A	DB, S, F, A
Prędkość pozorna [m/s]	gazu	0,01–10,0	0,1–50
	cieczy	0,04–5,0	0,02–2
			0,005–5,0

Z przedstawionego poniżej porównania zakresów występowania poszczególnych struktur przepływu (Rys. 8.32), wg danych własnych i literaturowych z tabeli 8.22, największą zgodność otrzymano dla przepływu rzutowego, uzyskując stosunkowo szeroki wspólny zakres występowania tej struktury, w którym znajduje się większość punktów danych własnych. Dla pozostałych zakresów występowania struktur (pianowej i pierścieniowej) zaobserwowano praktyczne brak zgodności pomiędzy analizowanymi danymi.



Rys. 8.32. Porównanie obszarów występowania przepływu w minikanale o $D_h=4$ mm z wynikami eksperymentalnymi własnymi oraz zebranych w tabeli 8.22 dla: a) struktury rzutowej S; b) struktur pianowych: SF+F; c) struktur pierścieniowych: FA+A

Natomiast ogólna statystyczna zgodność pomiędzy strukturami wyznaczonymi w badaniach własnych, a określonymi za pomocą mapy Chena i innych [9] oraz Barnea i innych [5] wynosiła odpowiednio 42,5 % i 46,4 %. Z kolei granica przejścia struktury rzutowej w pianową wg map wyżej wymienionych badaczy, wyznacza początek obszaru przejścia w badaniach własnych odpowiednio, pierwsza struktury pianowej, a druga pierścieniowej.








Rys. 8.33. Porównanie wyników badań własnych w minikanale o $D_h=4$ mm z danymi literaturowymi zebranych w tabeli 8.22

Tabela 8.23. Analiza porównawcza struktur wyznaczonych za pomocą PDF dla przepływu w minikanale o $D_h=4$ mm oraz określonych wg mapy przepływu a) Chena i innych [9]; b) Barnea i innych [5]

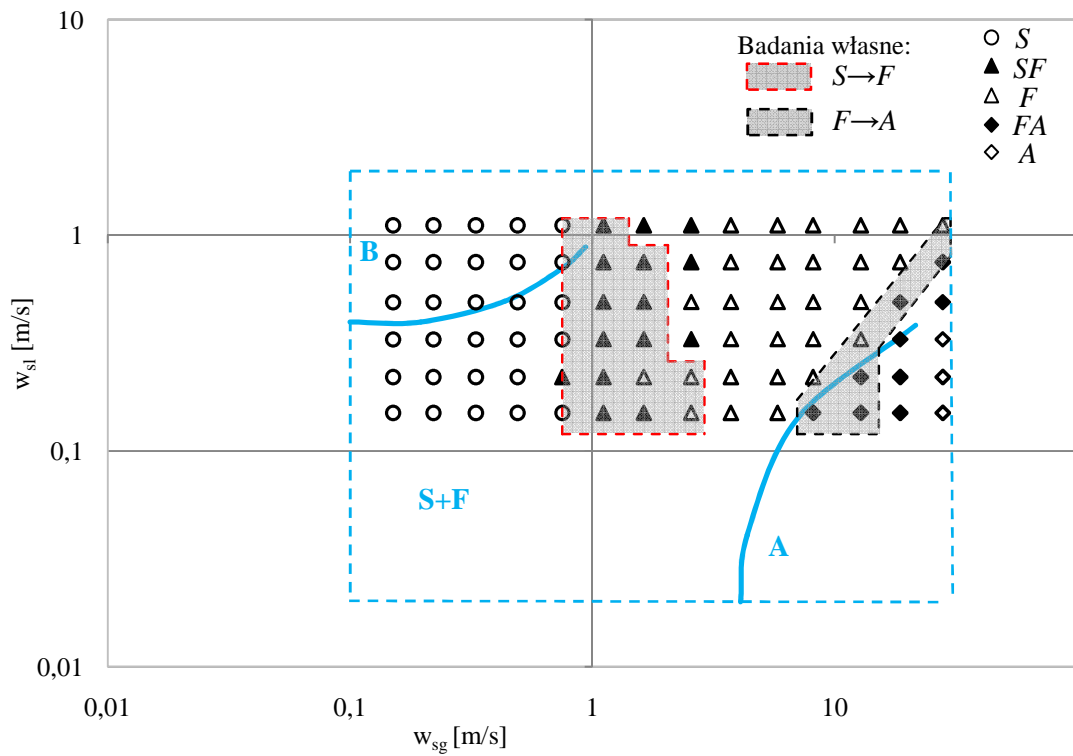
a)		Struktura wyznaczona za pomocą PDF (badania własne)				
Liczba punktów		DB+B	S	SF+F	FA+A	Σ
Struktura wyznaczona wg Chena i innych [9]	DB+B	0	2	0	0	2
	S	0	26	1	0	27
	F	0	1	12	0	13
	A	0	0	24	0	24
	UN	0	0	11	7	18
	Σ	0	29	48	7	38
Zgodność					45,2 %	

b)		Struktura wyznaczona za pomocą PDF (badania własne)				
Liczba punktów		DB	S	SF+F	FA+A	Σ
Struktura wyznaczona wg Barnea i innych [5]	DB	0	0	0	0	0
	S	0	29	41	0	70
	F	0	0	7	4	11
	A	0	0	0	3	3
	Σ	0	29	48	7	39
Zgodność					46,4 %	

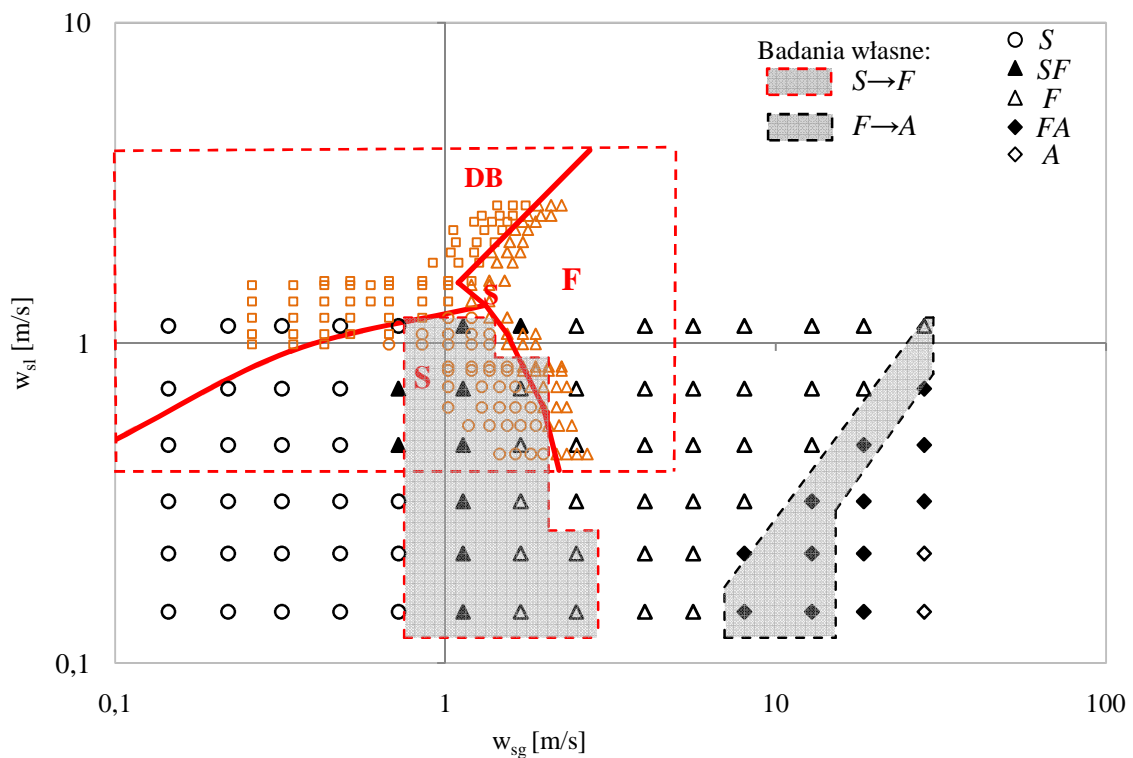
Tabela 8.24. Baza danych do porównania z przepływem w minikanale o
a) $D_h=5$ mm; b) i c) $D_h=6$ mm

		a)	b)	c)
		Fukano i Kariyasaki [21]	Wölk i inni [92]	Wölk i inni [92]
Oznaczenie				 DB  S  F 146 punktów
D_h [mm]		4,9	6,1	6,1
Przekrój minikanalu		okrągły	prostokątny 6,0x6,2 mm	prostokątny 6,0x6,2 mm
Czynnik roboczy		powietrze/woda	powietrze/woda	powietrze/woda
Ciśnienie [MPa]		0,1	0,1	0,1
Temperatura [°C]		20	20	20
Struktury przepływu		B, I, A	DB, S, F	DB, S, F
Prędkość pozorna [m/s]	gazu	0,1–30,0	0,15–5,0	0,15–5,0
	cieczy	0,03–2,0	0,36–4,0	0,36–4,0

Na Rys. 8.34 i Rys. 8.35 dokonano porównania map przepływu przedstawionych w tabeli 8.24 z danymi eksperymentalnymi otrzymanymi podczas badań własnych. Statystyczną analizę zgodności wyników badań własnych z obszarami występowania poszczególnych struktur dla przepływu w minikanale o $D_h=5$ mm i $D_h=6$ mm zaprezentowano w tabeli 8.25. W przypadku porównania dla przepływu w drugim wymienionym minikanale oprócz linii granicznych Wölk i innych [92] naniesiono również otrzymane podczas ich badań punkty eksperymentalne. Ta analiza wykazała bardzo małą zgodność, gdyż ponad 67% punktów własnych leży poza obszarem proponowanej mapy. W przypadku przepływu w minikanale o $D_h=5$ mm zgodność pomiędzy wynikami badań własnych i strukturą wyznaczona za pomocą mapy Fukano i Kariyasaki [21] wynosiła 79,7%. Wyznaczona przez badaczy granica przejścia struktury pianowej w pierścieniową przebiega podobnie w przeprowadzonym zakresie prędkości faz w badaniach własnych. Jednakże Fukano i Kariyasaki [21] przedstawili na swojej mapie zakres struktury pęcherzykowej B, której nie zaobserwowano w badaniach własnych oraz strukturę przejściową I, której szeroki zakres jest przyczyną wysokiej zgodności z badaniami własnymi.



Rys. 8.34. Porównanie wyników badań własnych w minikanale o $D_h=5$ mm z danymi literaturowymi zebranych w tabeli 8.24 a)

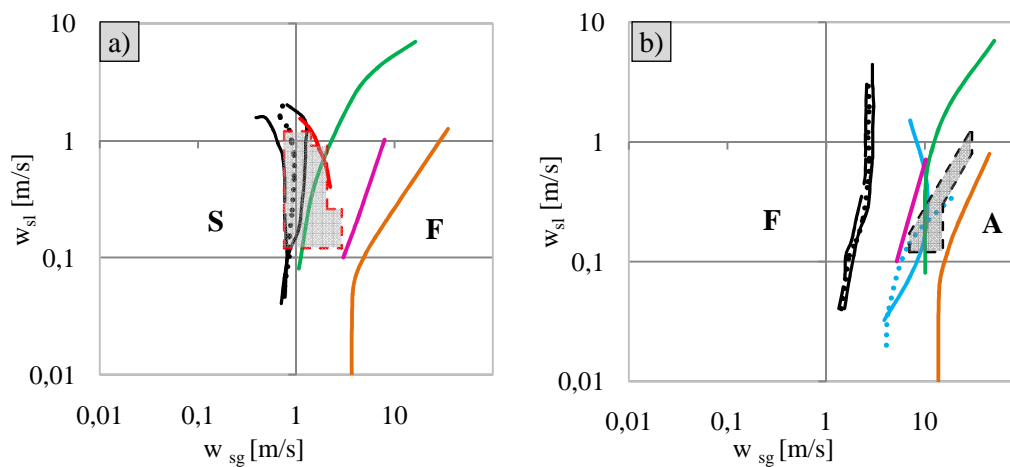


Rys. 8.35. Porównanie wyników badań własnych w minikanale o $D_h=6$ mm z danymi literaturowymi zebranych w tabeli 8.24 c) i b)

Tabela 8.25. Analiza porównawcza struktur wyznaczonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa i określonych wg mapy przepływu
 a) Fukano i Kariyasaki [21] dla $D_h=5$ mm; b) Wölka i innych [92] dla $D_h=6$ mm

a)		Struktura wyznaczona za pomocą PDF (badania własne)			
Liczba punktów		B	S+SF+F	FA+A	Σ
Struktura wyznaczona wg Fukano i Kariyasaki [21]	B	0	14	0	14
	S+F	0	58	3	61
	A	0	0	9	9
	Σ	0	72	12	67
Zgodność					79,7 %

b)		Struktura wyznaczona za pomocą PDF (badania własne)				
Liczba punktów		DB	S	SF+F	FA+A	Σ
Struktura wyznaczona wg Wölka i innych [92]	DB	0	5	0	0	5
	S	0	8	7	0	15
	F	0	0	7	0	7
	UN	0	15	28	14	57
	Σ	0	28	42	14	29
Zgodność					34,5 %	



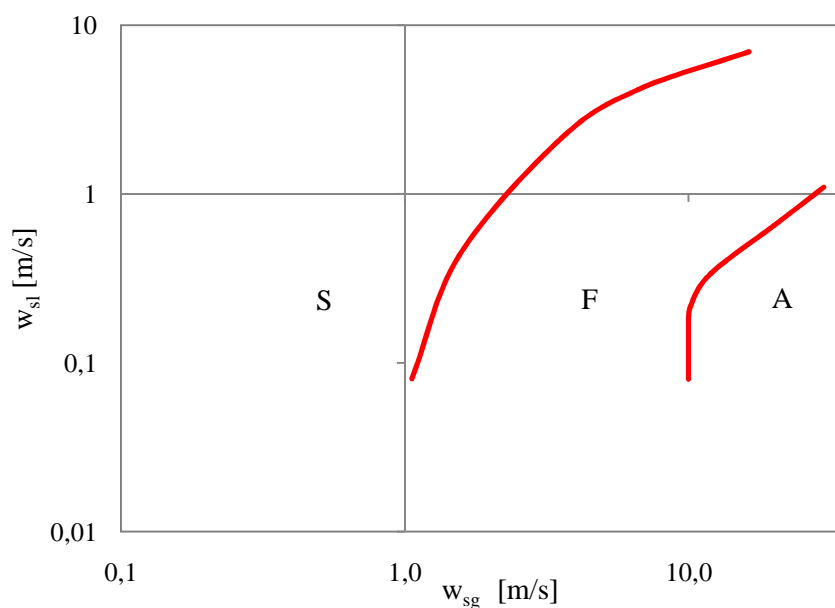
- Chen i inni [9]:
- $D_h = 2,01$ mm
 - $D_h = 2,88$ mm
 - $D_h = 4,26$ mm
 - Zhao i Bi [100], $D_h = 2,882$ mm
 - Ide i inni [30], $D_h = 2$ mm
- Fukano i Kariyasaki [21]:
- $D_h = 2,4$ mm
 - $D_h = 4,9$ mm
 - Barnea i inni [5], $D_h = 4$ mm
 - Wölka i inni [92], $D_h = 6,1$ mm

- Badania własne:
- $S \rightarrow F$
 - $F \rightarrow A$

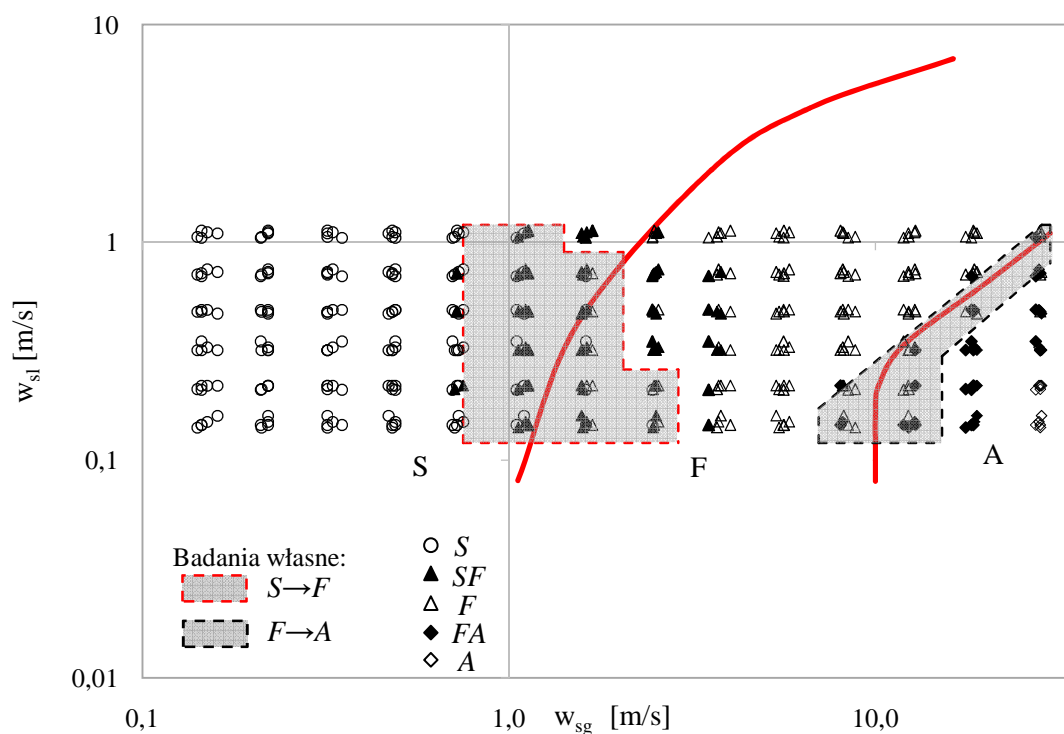
Rys. 8.36. Porównanie granic przejścia analizowanych map przepływu pomiędzy strukturą a) rzutową a pianową; b) pianową a pierścieniową

Na Rys. 8.36 powyżej zestawiono wszystkie linie graniczne pomiędzy strukturą rzutową a pianową oraz pianową a pierścieniową, wg analizowanych map przepływu cytowanych w literaturze, na tle obszarów tworzenia się danych struktur wg zaproponowanej mapy własnej. Aczkolwiek w przypadku powyższych porównań trudno jest mówić o zgodności ilościowej (ze względu na stosunkowo niski zakres prędkości faz w badaniach własnych), to jednak w przypadku przepływu pianowego i pierścieniowego można zaobserwować podobny trend w położeniu poszczególnych linii granicznych. Powyższe porównania pozwoliły na określenie linii granicznej pomiędzy strukturą rzutową a pianową, za którą przyjęto linię zaproponowaną wg mapy Zhao i Bi [100], między innymi ze względu na wynik wcześniejszej analizy, który wykazał prawie 85% zgodności pomiędzy badaniami własnymi a strukturami wyznaczonymi za pomocą tej właśnie mapy. Jeśli chodzi o granicę przejścia pomiędzy strukturą pianową i pierścieniową przyjęto linię z nałożenia dwóch linii wg mapy Fukano i Kariyasaki [21] dla $D_h = 2,4$ mm i wg Zhao i Bi [100] i dalej wg początku tworzenia się obszaru struktury pierścieniowej wg badań własnych.

Dla podsumowania, na podstawie wyników badań własnych oraz wynikach analizy porównawczej map przepływu cytowanych w literaturze, na Rys. 8.37 zaproponowano mapę przepływu mieszaniny gaz-ciecz dla przepływu wznoszącego w minikanalach. Na mapie przepływu wyróżniono trzy struktury przepływu. Natomiast na Rys. 8.38 i w tabeli 8.26 przedstawiono analizę porównawczą proponowanej mapy przepływu z wynikami badań własnych.



Rys. 8.37. Proponowana mapa przepływu



Rys. 8.38. Porównanie proponowanej mapy przepływu z wynikami badań własnych

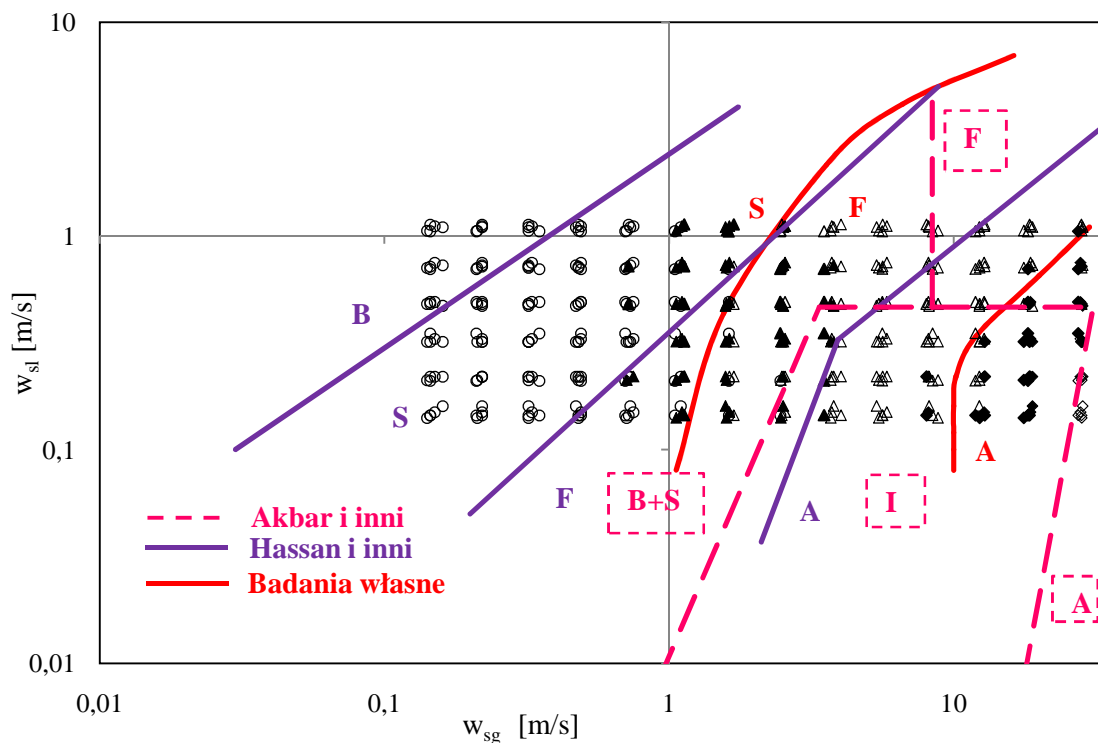
Tabela 8.26. Analiza porównawcza struktur wyznaczonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa i określonych wg proponowanej mapy przepływu

Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą PDF (badania własne)			
		S	SF+F	FA+A	Σ
Struktura wyznaczona wg proponowanej mapy przepływu	S	160	34	0	194
	F	5	157	5	167
	A	0	12	47	59
	Σ	165	203	52	364
Zgodność					86,6 %

Z porównania w tabeli 8.26 zaproponowanej mapy przepływu z wynikami badań własnych uzyskano zgodność rzędu 86,6 %. Na mapie znajduje się również wstępna propozycja z zakresami przejścia pomiędzy poszczególnymi strukturami (Rys. 8.22). Tak wysoka zgodność potwierdza założenie, iż dla przepływu gaz-ciecz w minikanalach struktury przepływu można określić zgodnie z przedstawioną mapą (Rys. 8.37).

8.5. Porównanie proponowanej mapy własnej z mapami uniwersalnymi dla minikanalów

Istniejące w literaturze przedmiotu uniwersalne mapy przepływu dwóch różnych zespołów badaczy: Hassana i innych [27],[28] oraz Akbara i innych [1] porównano z wynikami badań własnych (Rys. 8.39 i Tabela 8.27). W przypadku analizy porównawczej mapy zaproponowanej przez Hassana i innych [27],[28] uzyskano zgodność rzędu 61,1 % (Tabela 8.27a), co pozwala stwierdzić że dla minikanalów od 2 do 6 mm nie jest ona dokładna. Natomiast konieczne są również dalsze badania w celu określenia mapy w minikanalach mniejszych o 2 mm. Wynik przedstawionej analizy porównawczej struktur określonych podczas badań własnych z mapą zaproponowaną przez Akbara i innych [1] (Rys. 8.39 i Tabela 8.27b) uzasadnił poprawność założenia, iż dla przepływu gaz-ciecz w minikanalach struktury przepływu można określić zgodnie z przedstawioną mapą (Rys. 8.37).



Rys. 8.39. Porównanie wyników badań własnych z mapami uniwersalnymi dla minikanalów zaproponowanymi w literaturze

Tabela 8.27. Analiza porównawcza struktur wg własnej ujednoliconej mapy i określonych wg mapy przepływu: a) Hassana i innych [28]; b) Akbara i innych [1]

a)		Struktura wyznaczona za pomocą PDF (badania własne)				
Liczba punktów		B	S	SF+F	FA+A	Σ
Struktura wyznaczona wg Hassana i innych [28]	B	0	30	0	0	30
	S	0	111	20	0	131
	F	0	24	94	0	118
	A	0	0	89	52	141
	Σ	0	165	203	52	257
Zgodność					61,1 %	

b)		Struktura wyznaczona za pomocą PDF (badania własne)			
Liczba punktów		S	SF+F	FA+A	Σ
Struktura wyznaczona wg Akbara i innych [1]	B+S	164	107	0	271
	F+I	1	96	43	140
	A	0	0	9	9
	Σ	165	203	52	269
Zgodność					64 %

8.6. Model poślizgu faz w minikanalach

Udział faz w przepływającej mieszaninie dwufazowej jest jedną z trzech podstawowych wielkości charakteryzujących przepływ mieszaniny gaz-ciecz (obok struktury przepływającej mieszaniny i oporów przepływu dwufazowego). Dlatego należy do kluczowych parametrów opisujących hydrodynamikę przepływu dwufazowego, a jego wielkość pozwala na wyznaczenie gęstości mieszaniny, spadków ciśnienia, których znajomość z kolei jest niezbędna już na etapie projektowania urządzeń w których przepływ dwufazowy jest realizowany. Udział objętościowy fazy gazowej α_g , jest ściśle powiązany z udziałem objętościowym fazy ciekłej α_l , co opisuje zależność:

$$\alpha_l + \alpha_g = 1 \quad (8-2)$$

Udział objętościowy fazy gazowej zależy od wielu parametrów, a największy wpływ na tę wartość mają: wielkości strumieni i właściwości fizyczne doprowadzonych faz oraz geometria minikanalu. Zważywszy na to, że właściwości fizyczne i kierunek przepływu w uogólnieniu można przyjąć za parametry niezmiennie w przeprowadzonych badaniach, głównym czynnikiem decydującym o wartości udziału objętościowego są strumienie dozowanych faz oraz średnica minikanalu. Złożoność procesów przepływów dwufazowych oraz ich stochastyczny charakter powoduje, że pomiar udziału objętościowego nie jest zadaniem łatwym, czego wyrazem jest wiele badań teoretycznych jak i eksperymentalnych, nad modelami przewidywania wielkości tychże udziałów. Rozważania modelowe w zdecydowanej większości odnoszą się do przepływu wznoszącego w kanale pionowym lub poziomym.

Literatura przedmiotu dotycząca metod korelacyjnych służących wyznaczeniu udziałów objętościowych skupia się wokół rozwinięcia modelu poślizgu faz według Zubera-Findlaya [102]. W niniejszej pracy dzięki zastosowaniu bezinwazyjnej metody określenia prędkości rzeczywistej gazu postanowiono zastosować ten model. Ze względu jednak na to, że bezpośrednia adaptacja procedur obliczeniowych udziału objętościowego w kanałach konwencjonalnych do minikanalów jest ryzykowna, istnieje potrzeba ich weryfikacji eksperymentalnej. Jedną z form tej weryfikacji jest obliczenie zależności opisujących stałe modelu Zubera-Findlaya [102].

Model poślizgu zaproponowany przez Zubera i Findlaya [102] określa prędkość przepływu porcji gazu w mieszaninie dwufazowej jako superpozycję ruchu tej mieszaniny z prędkością w_T oraz względnego ruchu (unoszenia) pęcherza gazu w_{dr} . Zatem rzeczywistą

prędkość struktur gazowych można obliczyć z równania, gdzie C_0 to współczynnik rozkładu:

$$w_g = C_0 w_T + w_{dr} \quad (8-3)$$

Sumaryczna prędkość fazy gazowej i porcji cieczy określona jest równaniem:

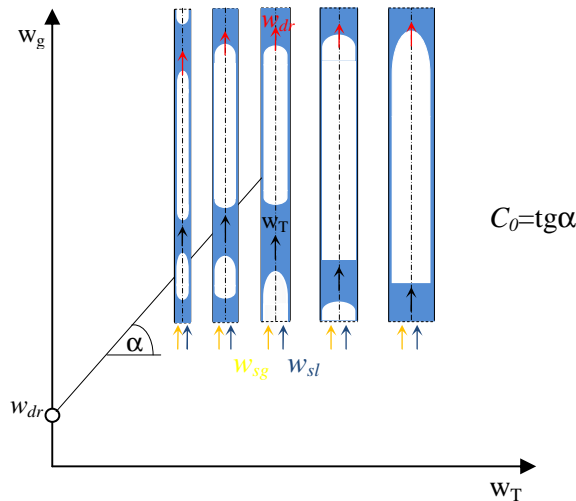
$$w_T = w_{sg} + w_{sl} \quad (8-4)$$

w którym w_{sg} i w_{sl} oznaczają odpowiednio prędkość pozorną gazu i cieczy.

Posługując się modelem poślizgu można wyznaczyć udział fazy gazowej α_g :

$$\alpha_g = \frac{w_{sg}}{w_g} \quad (8-5)$$

W modelu tym szczególnie istotną rolę odgrywa prędkość względną (dryfu w_{dr}) czyli prędkość przepływu jednej fazy względem drugiej, którą można również określić jako prędkość fazy gazowej w nieskończonej objętości nieruchomej cieczy. Równanie (8-3) wskazuje na liniową zależność w_g od pozornej prędkości przepływu mieszaniny dwufazowej w_T , które jest ogólną zależnością umożliwiającą określenie udziału fazy gazowej w przepływającej mieszaninie dwufazowej, co wykorzystano w celu eksperymentalnego wyznaczenia parametrów modelu poślizgu C_0 i w_{dr} (Rys. 8.40).

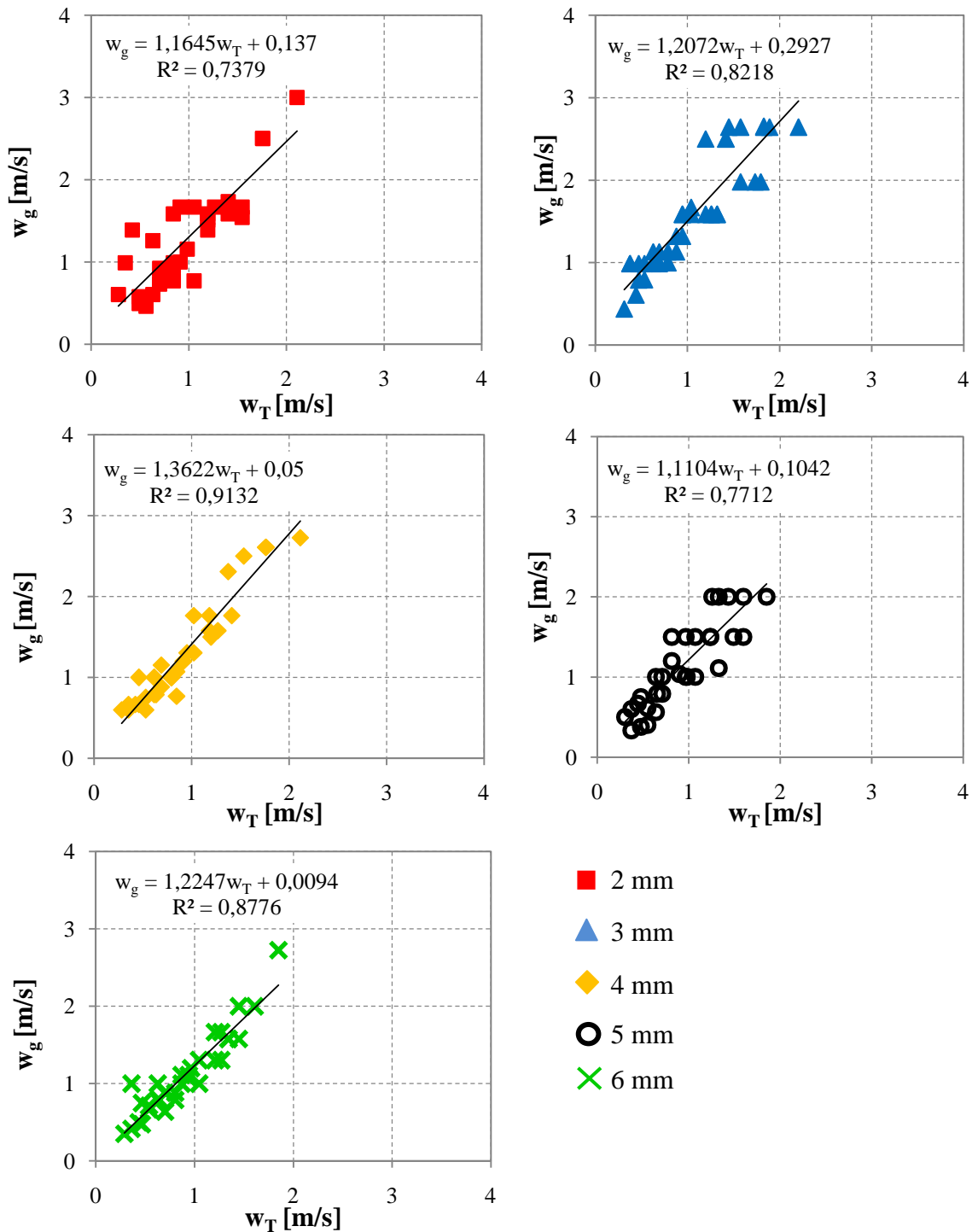


Rys. 8.40. Przepływ struktur rzutowych w minikanalach pionowych dla przepływu współprądowego wznoszącego wg: [83]

Wartości tych parametrów zależą od rodzaju struktury przepływającej mieszaniny dwufazowej, właściwości fizycznych cieczy i gazu, kierunku przepływu oraz wymiaru kanałów. Biorąc pod uwagę to, że właściwości fizyczne, a także kierunek przepływu mieszaniny można przyjąć za wartości niezmiennie w przeprowadzonych badaniach,

głównym czynnikiem decydującym o wartości parametrów C_0 i w_{dr} może być średnica hydrauliczna kanału D_h , w której odbywa się przepływ.

Na poniższych wykresach (Rys. 8.41) przedstawiono graficzną prezentację modelu poślizgu dla przepływu wznoszącego w zależności od średnicy minikanалу, gdzie prędkość w_g została zmierzona za pomocą funkcji korelacji wzajemnej, co opisano szeroko w rozdziale 7.3 a ich wartości zestawiono w tabeli 8.28.



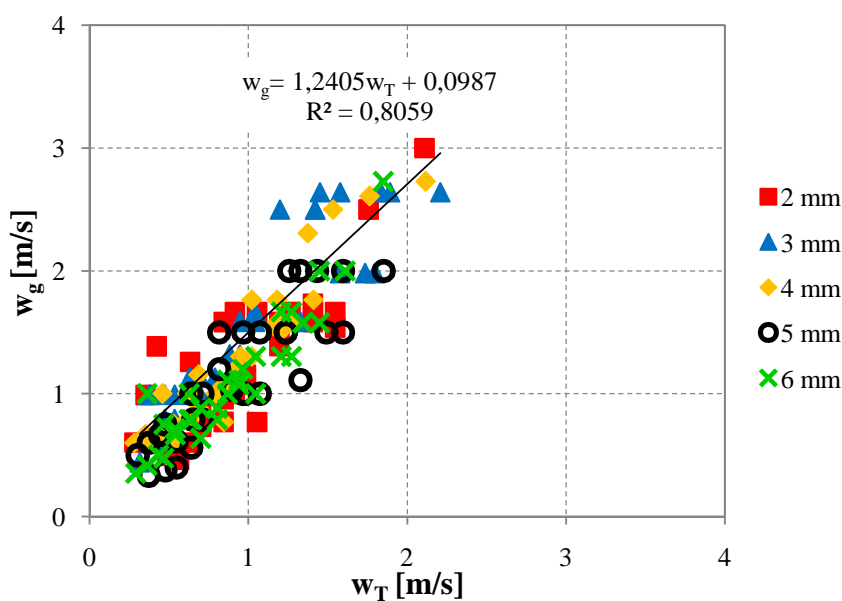
Rys. 8.41. Graficzna interpretacja modelu poślizgu fazy dla poszczególnych minikanalów (Tabela 8.28)

Tabela 8.28. Wartości prędkości struktur gazowych wyznaczone w toku badań własnych

Lp.	D_h [mm]														
	2			3			4			5			6		
	w_{sl}	w_{sg}	w_g	w_{sl}	w_{sg}	w_g	w_{sl}	w_{sg}	w_g	w_{sl}	w_{sg}	w_g	w_{sl}	w_{sg}	w_g
	[m/s]														
1.	0,14	0,14	0,60	0,16	0,16	0,44	0,14	0,14	0,60	0,15	0,15	0,50	0,14	0,14	0,35
2.	0,14	0,35	0,50	0,16	0,22	0,99	0,14	0,21	0,60	0,15	0,22	0,60	0,14	0,22	0,42
3.	0,14	0,49	0,60	0,16	0,32	0,79	0,14	0,32	1,00	0,15	0,33	0,38	0,14	0,32	0,48
4.	0,14	0,70	0,77	0,16	0,47	1,13	0,14	0,48	1,00	0,15	0,49	0,56	0,14	0,48	0,79
5.	0,14	1,05	1,39	0,16	0,73	1,32	0,14	0,71	0,77	0,22	0,15	0,33	0,14	0,72	1,00
6.	0,21	0,14	0,99	0,16	1,10	1,58	0,21	0,14	0,67	0,22	0,22	0,67	0,14	1,13	1,30
7.	0,21	0,21	1,39	0,16	1,58	1,98	0,21	0,21	0,67	0,22	0,33	0,40	0,22	0,14	1,00
8.	0,21	0,49	0,77	0,22	0,16	0,99	0,21	0,32	0,60	0,22	0,49	1,00	0,22	0,22	0,50
9.	0,21	0,70	1,00	0,22	0,22	0,61	0,21	0,48	1,15	0,22	0,75	1,00	0,22	0,32	0,71
10.	0,35	0,14	0,58	0,22	0,32	0,79	0,32	0,14	0,67	0,22	1,11	1,11	0,22	0,48	0,64
11.	0,35	0,21	0,46	0,22	0,47	1,13	0,32	0,21	0,75	0,33	0,15	0,75	0,22	0,72	1,07
12.	0,35	0,35	0,73	0,22	0,73	1,58	0,32	0,32	0,79	0,33	0,22	0,61	0,22	1,13	1,58
13.	0,35	0,49	0,99	0,22	1,10	1,58	0,32	0,48	1,00	0,33	0,33	0,79	0,32	0,14	0,75
14.	0,35	0,70	0,77	0,22	1,58	1,98	0,32	0,71	1,76	0,33	0,49	1,50	0,32	0,22	0,67
15.	0,35	1,05	1,73	0,32	0,16	0,99	0,48	0,14	0,79	0,33	0,75	1,00	0,32	0,32	0,79
16.	0,49	0,14	1,26	0,32	0,22	0,99	0,48	0,21	0,88	0,49	0,15	1,00	0,32	0,48	0,79
17.	0,49	0,21	0,92	0,32	0,32	1,00	0,48	0,32	1,00	0,49	0,22	0,79	0,32	0,72	1,00
18.	0,49	0,35	0,96	0,32	0,47	1,13	0,48	0,48	1,30	0,49	0,33	1,20	0,48	0,14	1,00
19.	0,49	0,49	1,16	0,32	0,73	1,67	0,48	0,71	1,76	0,49	0,49	1,00	0,48	0,22	0,88
20.	0,49	0,70	1,58	0,32	1,10	2,50	0,71	0,14	1,07	0,49	0,75	1,50	0,48	0,32	0,88
21.	0,49	1,05	1,54	0,32	1,58	2,64	0,71	0,21	1,20	0,49	1,11	1,50	0,48	0,48	1,20
22.	0,70	0,14	1,58	0,47	0,16	0,99	0,71	0,32	1,30	0,75	0,15	1,03	0,48	0,72	1,67
23.	0,70	0,21	1,67	0,47	0,22	0,99	0,71	0,48	1,58	0,75	0,22	1,50	0,72	0,14	1,11
24.	0,70	0,35	1,67	0,47	0,32	1,00	0,71	0,71	1,76	0,75	0,33	1,50	0,72	0,22	1,11
25.	0,70	0,49	1,54	0,47	0,47	1,58	0,71	1,06	2,61	0,75	0,49	1,50	0,72	0,32	1,30
26.	0,70	0,70	1,58	0,47	0,73	1,58	1,06	0,14	1,50	0,75	0,75	1,50	0,72	0,48	1,30
27.	0,70	1,05	2,50	0,47	1,10	1,98	1,06	0,21	1,58	1,11	0,15	2,00	0,72	0,72	1,58
28.	1,05	0,14	1,51	0,73	0,16	1,13	1,06	0,32	2,31	1,11	0,22	2,00	1,13	0,14	1,67
29.	1,05	0,21	1,67	0,73	0,22	1,32	1,06	0,48	2,50	1,11	0,33	2,00	1,13	0,22	1,58
30.	1,05	0,35	1,67	0,73	0,32	1,58	1,06	0,71	2,61	1,11	0,49	2,00	1,13	0,32	2,00
31.	1,05	0,49	1,67	0,73	0,47	2,50	1,06	1,06	2,73	1,11	0,75	2,00	1,13	0,48	2,00
32.	1,05	0,70	2,50	0,73	0,73	2,64							1,13	0,72	2,73
33.	1,05	1,05	3,00	0,73	1,10	2,64									
34.				1,10	0,16	1,58									
35.				1,10	0,22	1,58									
36.				1,10	0,32	2,50									
37.				1,10	0,47	2,64									
38.				1,10	0,73	2,65									
39.				1,10	1,10	2,64									

Punkty przedstawione na wykresach (Rys. 8.41) odnoszą się zasadniczo do struktur rzutowych określonych w trakcie badań eksperymentalnych.

Z graficznej prezentacji modelu poślizgu można zauważyć, że prędkość dryfu zmienia się w poszczególnych minikanalach od 0,29 m/s do 0,0094 m/s, przy czym największa jej wartość występuje w minikanale o $D_h=3$ mm, a najmniejsza w minikanale o $D_h=6$ mm. Natomiast największa wartość współczynnika rozkładu wystąpiła w minikanale o $D_h=4$ mm i wynosiła ona 1,36, z kolei najmniejsza $C_0=1,11$ miała miejsce w minikanale o $D_h=5$ mm. Wartość współczynnika regresji dla korelacji odwzorowującej model poślizgu fazy mieści się w zakresie od 0,85 do 0,95. W celu poszukiwania związku pomiędzy parametrem rozkładu i prędkością dryfu w minikanalach przedstawiono zależność prędkości zmierzonej od prędkości pozornej mieszaniny dwufazowej dla wszystkich badanych minikanalów. Parametr C_0 wynosi w tym przypadku 1,24, a prędkość dryfu $w_{dr}=0,0987$ m/s, przy współczynniku regresji równym 0,91 (Rys. 8.42).



Rys. 8.42. Graficzna prezentacja modelu poślizgu fazy dla wszystkich minikanalów

Wraz ze zmniejszeniem rozmiaru kanału następuje zmiana relacji sił panujących podczas przepływu gaz-ciecz, co powoduje wspomniany wcześniej problem niepewności bezpośredniej aplikacji procedur obliczeniowych dostępnych dla kanałów konwencjonalnych do minikanalów. W przepływie dwufazowym w minikanalach siły grawitacji i siły wyporu mają mniejsze znaczenie od sił napięcia powierzchniowego i sił adhezji, które stają się w nich dominujące [1]. W celu adaptacji modelu Zubera-Findlaya [102] do przepływu w minikanalach, postanowiono w oparciu o analizę korelacji danych

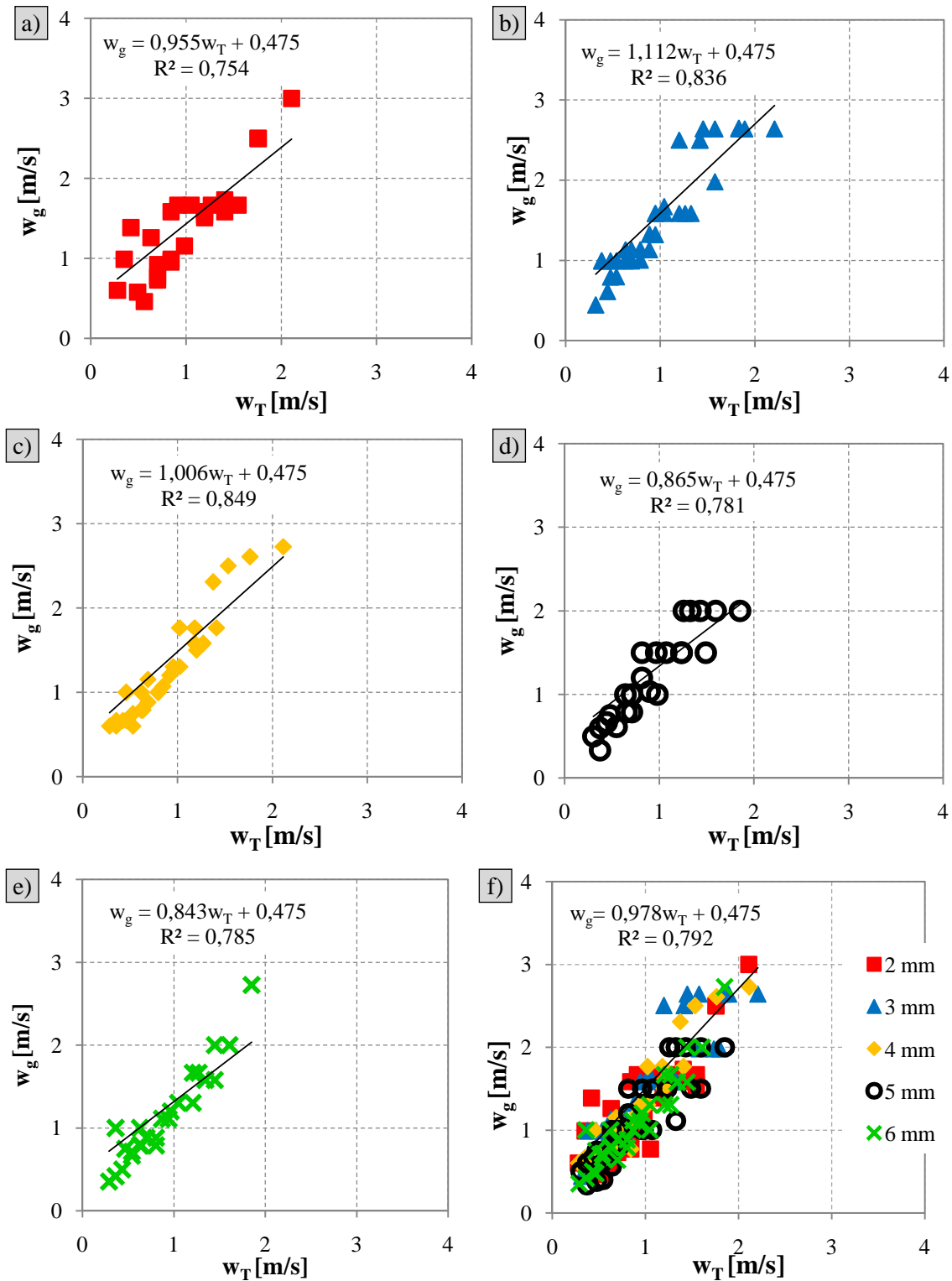
własnych i literaturowych, zaproponować własny model. Jak widać dotychczasowe poszukiwania oparte na korelacji z dwoma parametrami (C_0 i w_{dr}) nie wykazuje na żadną klarowną tendencję. Postanowiono więc wykorzystując zależności przedstawione w tabeli 8.29, wyniki badań własnych aproksymować, jak dla modelu Zuber-Findlaya [102], zakładając jako parametr poszukiwany współczynnik rozkładu C_0 , przyjmując, że prędkość unoszenia struktury rzutowej była obliczana według równań (8-6)-(8-9). A zatem dzięki propozycjom wyznaczonych prędkości dryfu w_{dr} , zależność (8-3) można sprowadzić do poszukiwania tylko jednego parametru.

Tabela 8.29. Równania korelacyjne prędkości poślizgu w_{dr}

Model GE RAMP [84]	$w_{dr} = 2,9 \left[\frac{g \sigma (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right]^{0,25}$ dla $\alpha_g \leq 0,65$	D _h [mm]	2	$w_{dr}=0,475$	(8-6)
			3		
			4		
			5		
			6		
Mishima i Hibiki [50]	$w_{dr} = (0,23 + 0,13 \frac{b}{a}) \sqrt{\frac{\Delta \rho g a}{\rho_l}}$	D _h [mm]	2	$w_{dr}=0,0498$	(8-7)
			3	$w_{dr}=0,0614$	
			4	$w_{dr}=0,0709$	
			5	$w_{dr}=0,0786$	
			6	$w_{dr}=0,0863$	
Nicklin i inni [56]	$w_{dr} = 0,35 \sqrt{g D_h}$	D _h [mm]	2	$w_{dr}=0,0489$	(8-8)
			3	$w_{dr}=0,0597$	
			4	$w_{dr}=0,0693$	
			5	$w_{dr}=0,0775$	
			6	$w_{dr}=0,0849$	
Mishima i Hibiki [51]	$w_{dr} = 0$	D _h [mm]	2	$w_{dr} = 0$	(8-9)
			3		
			4		
			5		
			6		

Na Rys. 8.43 przedstawiono wielkości prędkości rzeczywistych struktur gazowych z narzuconą prędkością dryfu według równania (8-6), dla poszczególnych minikanałów, oraz dla wszystkich minikanałów jednocześnie (Rys. 8.43f). W wyniku tej analizy warunkowej

współczynnik rozkładu dla wszystkich minikanalów wynosi $C_o=0,978$, przy współczynniku regresji równym 0,89, co oznacza że prędkość dryfu na poziomie 0,475 m/s nie jest odpowiednią w przypadku przepływu gaz-ciecz w minikanalach.



Rys. 8.43. Graficzna interpretacja modelu poślizgu faz z narzuconą w_{dr} według równania (8-6) dla: a) $D_h=2$ mm, b) $D_h=3$ mm, c) $D_h=4$ mm, d) $D_h=5$ mm, e) $D_h=6$ mm, f) wszystkich minikanalów

Mishima i Hibiki [50] w swojej pracy przedstawiają równanie na prędkość dryfu (równanie 8-7) dla kanałów szczelinowych, których obliczona wartość została narzucona na wyniki badań prędkości rzeczywistej struktur gazowych, otrzymując w równaniu korelacyjnym gdzie pozyskiwanym parametrem jest współczynnika rozkładu C_0 przedstawiony w tabeli 8.30.

Tabela 8.30. Wartości współczynników rozkładu i współczynników regresji dla obliczonych prędkości dryfu z równania korelacyjnego (8-7)

D_h [mm]	C_0	w_{dr} [m/s]	R^2
2	1,2373	0,0498	0,734
3	1,3861	0,0614	0,800
4	1,3441	0,0709	0,913
5	1,1334	0,0786	0,771
6	1,1535	0,0863	0,874

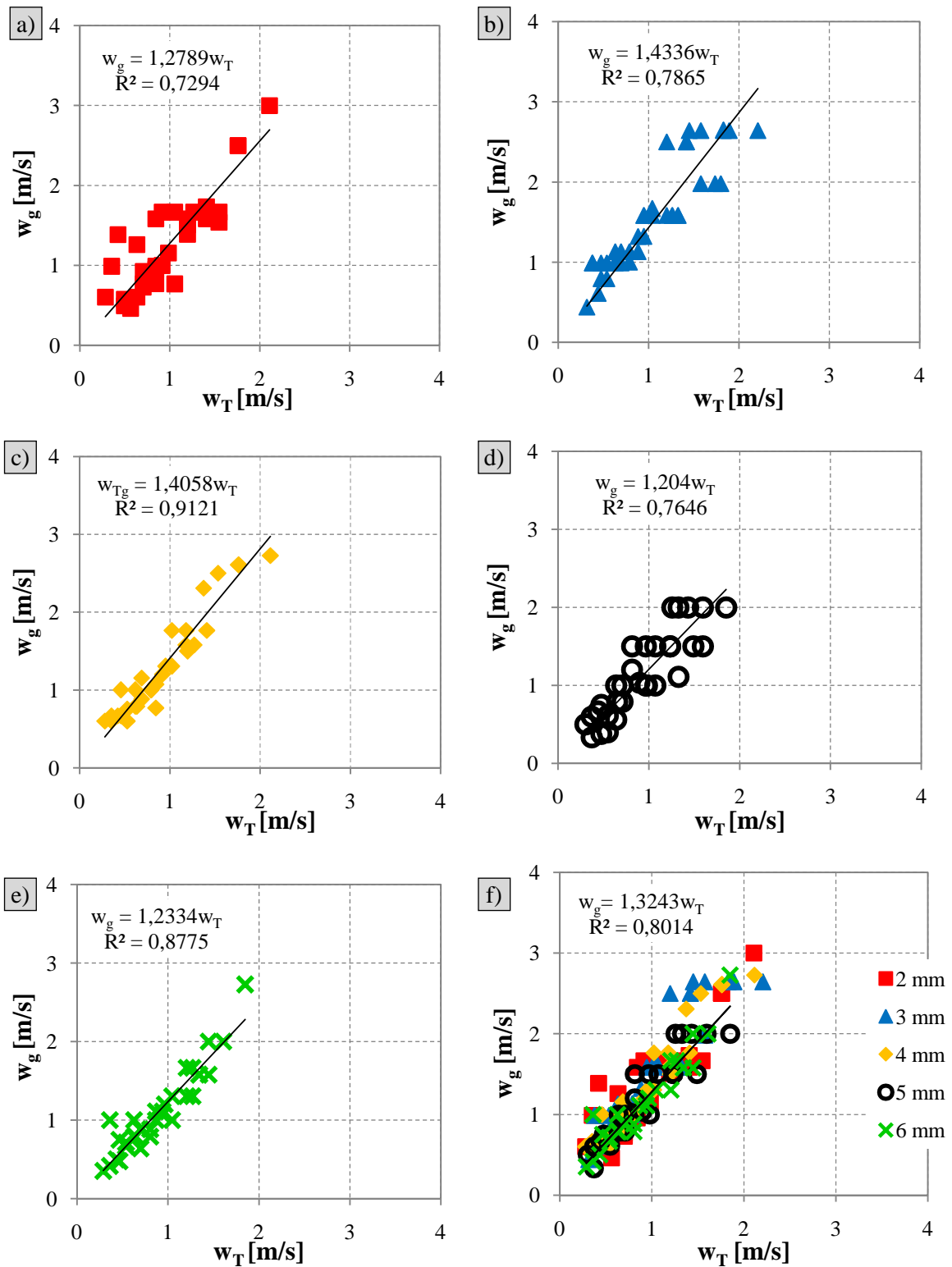
W tabeli 8.31 przedstawiono informacje o wartościach współczynnika rozkładu które dla narzuconych prędkości dryfu obliczonymi z równania (8-8), mieszczą się w przedziale od 1,1344 do 1,3874. Jest to zgodne z sugestiami Ide i innych [30], że wartość C_0 dla przepływu wznoszącego powinna być większa od 1.

Tabela 8.31. Wartości współczynników rozkładu i współczynników regresji dla obliczonych prędkości dryfu z równania korelacyjnego (8-8)

D_h [mm]	C_0	w_{dr} [m/s]	R^2
2	1,238	0,0489	0,734
3	1,3874	0,0597	0,799
4	1,3454	0,0693	0,913
5	1,1344	0,0775	0,771
6	1,1548	0,0849	0,874

Natomiast na tle badań Ide i inni [30] przeprowadzonych w minikanalach, wartości w_{dr} w równaniu (8-8), dla dużych wartości prędkości pozornych przepływu mieszaniny dwufazowej, były pomijalnie małe. Również z analizy danych doświadczalnych w badaniach Mishimy i Hibiki [51] wynika, że prędkość w_{dr} przyjmuje wartości bliskie zeru. W związku z powyższym jako jedną z hipotez, prędkość dryfu równą zero uznano za najbardziej odpowiednią w prowadzonych badaniach własnych, gdyż odnosi się do przepływu z dominującym udziałem struktur rzutowych w minikanalach. W związku z tym

prędkość ta została narzucona jak uprzednio na wyniki badań prędkości rzeczywistej struktur gazowych (Rys. 8.44), co wcześniej zostało przedstawione w pracy [91].



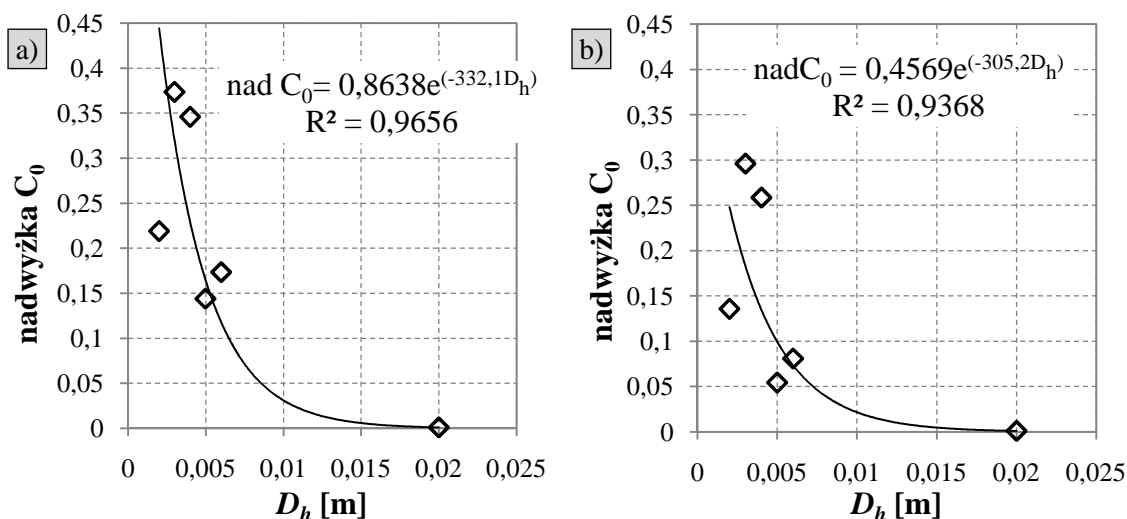
Rys. 8.44. Graficzna interpretacja modelu poślizgu faz z narzuconą w_{dr} według równania (8-9) dla: a) $D_h=2$ mm, b) $D_h=3$ mm, c) $D_h=4$ mm, d) $D_h=5$ mm, e) $D_h=6$ mm, f) wszystkich minikanatów

Otrzymując wartości współczynnika rozkładu dla narzuconej $w_{dr}=0$ m/s, a także dla $w_{dr}=0,1$ m/s czyli prędkości otrzymanej z linowej zależności prędkości rzeczywistych struktur gazowych we wszystkich badanych minikanalach od prędkości pozornej mieszaniny dwufazowej (Tabela 8.32) została przeprowadzona próba wyznaczenia C_0 przy założeniu, że stała C_0 w modelu Zubera-Findlaya [102] dla przepływu dwufazowego w minikanalach zależy od jego średnicy.

Tabela 8.32. Wartości współczynników rozkładu i współczynników regresji dla $w_{dr}=0,1$ m/s dla poszczególnych minikanalów

D_h [mm]	C_0	w_{dr} [m/s]	R^2
2	1,1954	0,1	0,737
3	1,3562		0,807
4	1,3187		0,912
5	1,1141		0,771
6	1,1408		0,873

Zgodnie wynikami Kuchczyńskiej [42] wartość współczynnika rozkładu dla kanałów konwencjonalnych, wynosi $C_0=1,06$. A zatem od wartości tej odjęto wartości zmierzonych współczynników rozkładu uzyskując w ten sposób nadwyżkę C_0 , którą następnie skorelowano i przedstawiono na wykresach (Rys. 8.45).



Rys. 8.45. Określenie nadwyżki parametru rozkładu dla: a) $w_{dr}=0$; b) $w_{dr}=0,1$ m/s

Postępując w ten sposób otrzymano zależność przedstawiającą się w następującej ogólnej postaci:

$$C_0 = C_{Kon} + A * e^{(B * D_h / D_r)} \quad (8-10)$$

gdzie:

C_{Kon} – wartość parametru rozkładu dla kanałów konwencjonalnych według [42],

A, B – wartości wyznaczone w toku badań własnych,

D_r – średnica reprezentatywna dla kanałów konwencjonalnych (0,02 m).

W ten sposób otrzymano dwie propozycje opisujące zależność parametru rozkładu dla minikanalów:

$$\bullet C_0 = 1,06 + 0,8639 * e^{(-6,642 \frac{D_h}{D_r})} \quad \text{dla } w_{dr} = 0 \text{ m/s;} \quad (8-11)$$

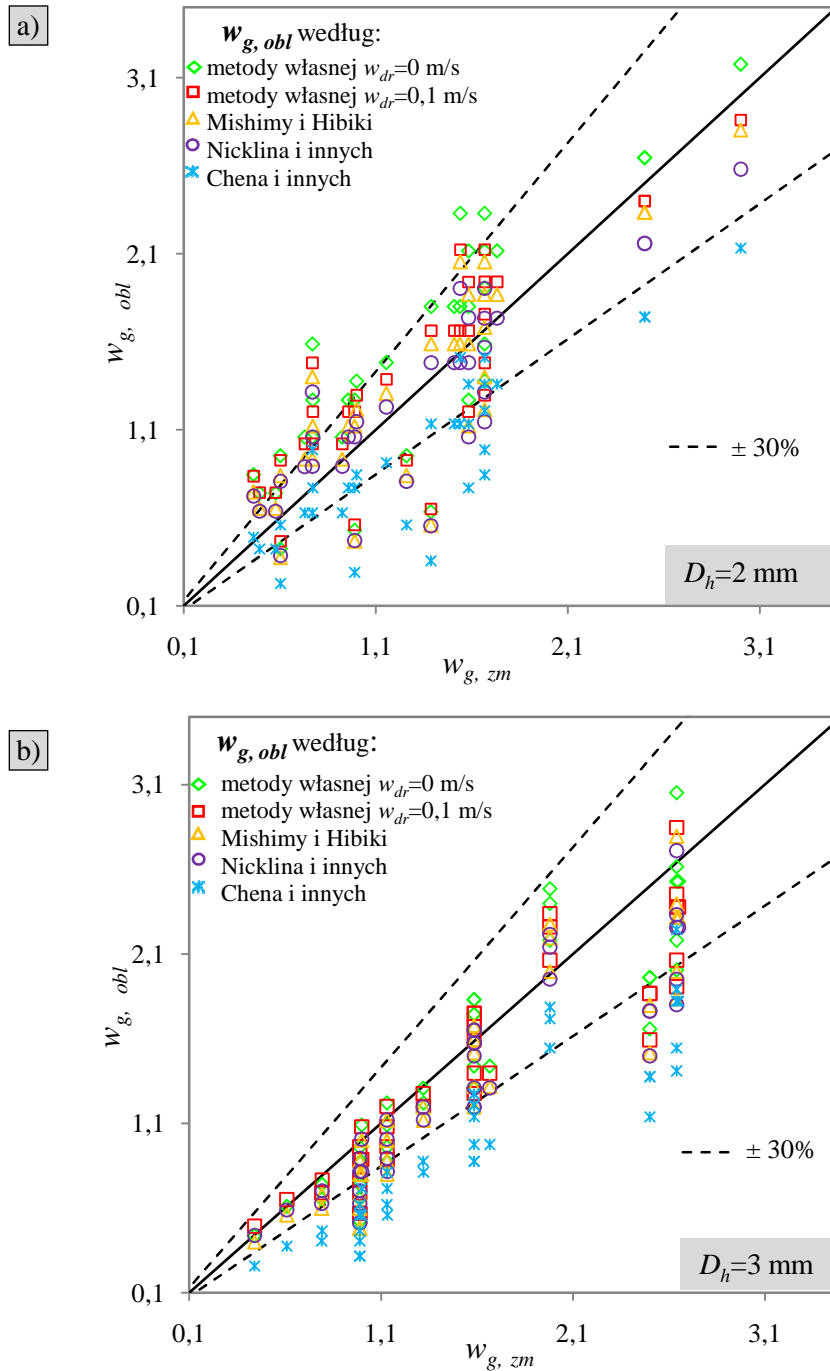
$$\bullet C_0 = 1,06 + 0,4569 * e^{(-6,104 \frac{D_h}{D_r})} \quad \text{dla } w_{dr} = 0,1 \text{ m/s} \quad (8-12)$$

Dlatego też w kolejnym kroku poszukiwania wzoru opisującego parametr rozkładu dla minikanalów podjęto analizę porównawczą w celu wyboru odpowiedniego równania. Oprócz dwóch propozycji własnych wzięto pod uwagę również trzy istniejące metody sformułowane przez innych badaczy (Tabela 8.33).

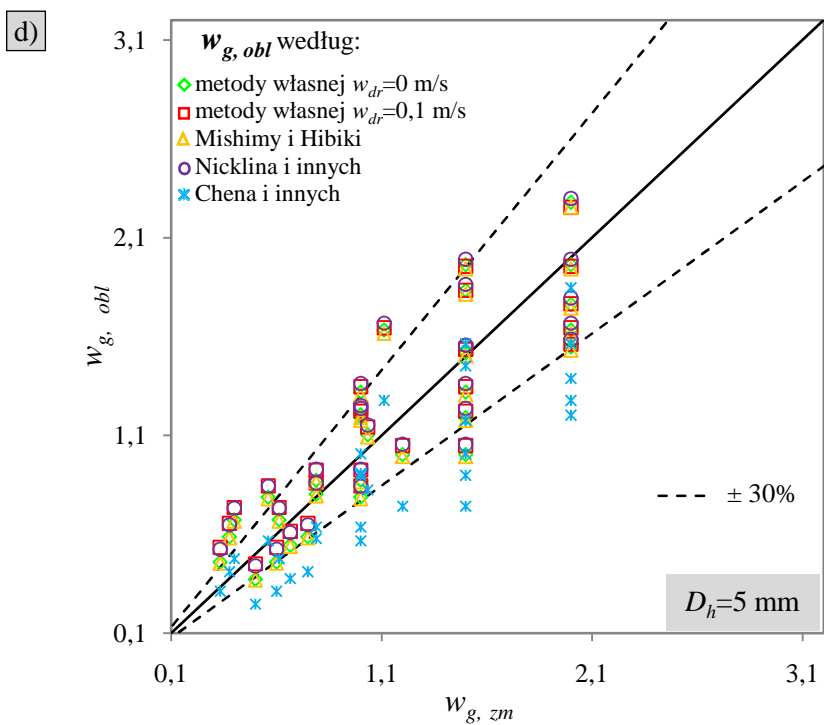
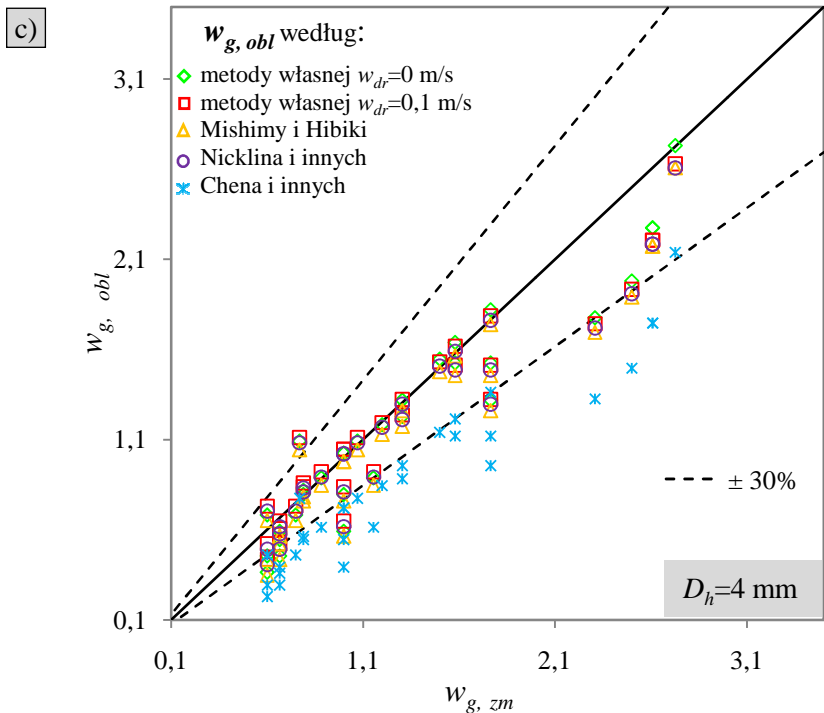
Tabela 8.33. Charakterystyka metod obliczania udziału objętościowego gazu w przepływie dwufazowym gaz-ciecz w minikanalach

Metoda	Charakterystyka metody	Równanie	α_g
własna I	$C_0 = 1,06 + 0,8639 * e^{(-6,642 \frac{D_h}{D_r})}$ $w_{dr} = 0 \text{ m/s}$	(8-11)	Równanie (8-5)
własna II	$C_0 = 1,06 + 0,4569 * e^{(-6,104 \frac{D_h}{D_r})}$ $w_{dr} = 0,1 \text{ m/s}$	(8-12)	
Mishimy i Hibiki [51]	$C_0 = 1,2 + 0,510 * e^{(-0,691 * D_h^*)}$ $w_{dr} = 0 \text{ m/s}$ * gdzie D_h [mm]	(8-13)	
Nicklina i innych [56]	$C_0 = 1,2$ $w_{dr} = 0,35 \sqrt{g D_h}$	(8-14)	
Chena i innych [10]	$w_g = 0,932 * w_T^{1,11}$ $w_{dr} = 0 \text{ m/s}$	(8-15)	

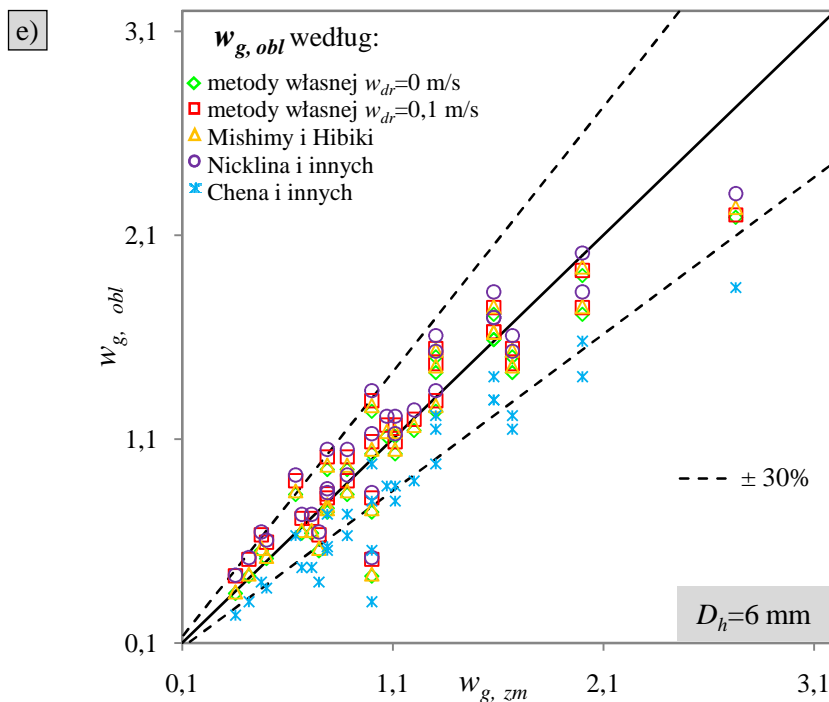
Wszystkie wytypowane metody obliczania udziału objętościowego w przepływie dwufazowym gaz-ciecz oparte są na modelu poślizgu faz. Jednakże analiza, której wynikiem ma być przedstawienie najbardziej optymalnego modelu, dotyczyła porównania wartości prędkości obliczonej z modelu poślizgu według pięciu metod (Tabela 8.33) i wyznaczonej z wykorzystaniem funkcji korelacji wzajemnej dla każdego minikanалу badaniach własnych.



Rys. 8.46. Porównanie wartości zmierzonych prędkości gazu z obliczonymi wg metod przedstawianych w tabeli 8.33 dla: a) $D_h=2$ mm, b) $D_h=3$ mm, c) $D_h=4$ mm, d) $D_h=5$ mm, e) $D_h=6$ mm



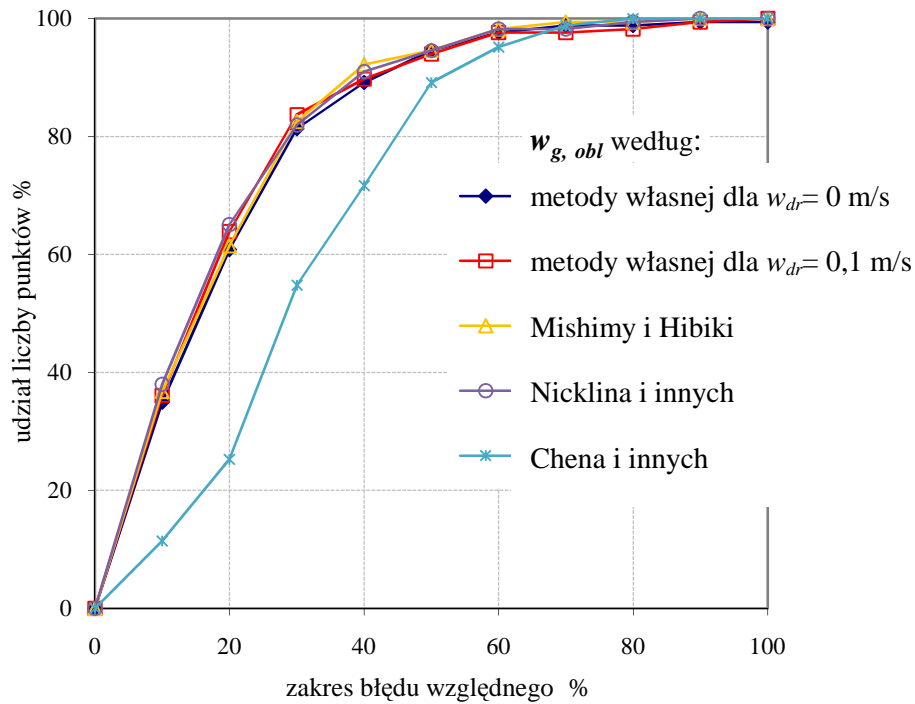
c.d. **Rys. 8.46**



c.d. **Rys. 8.46**

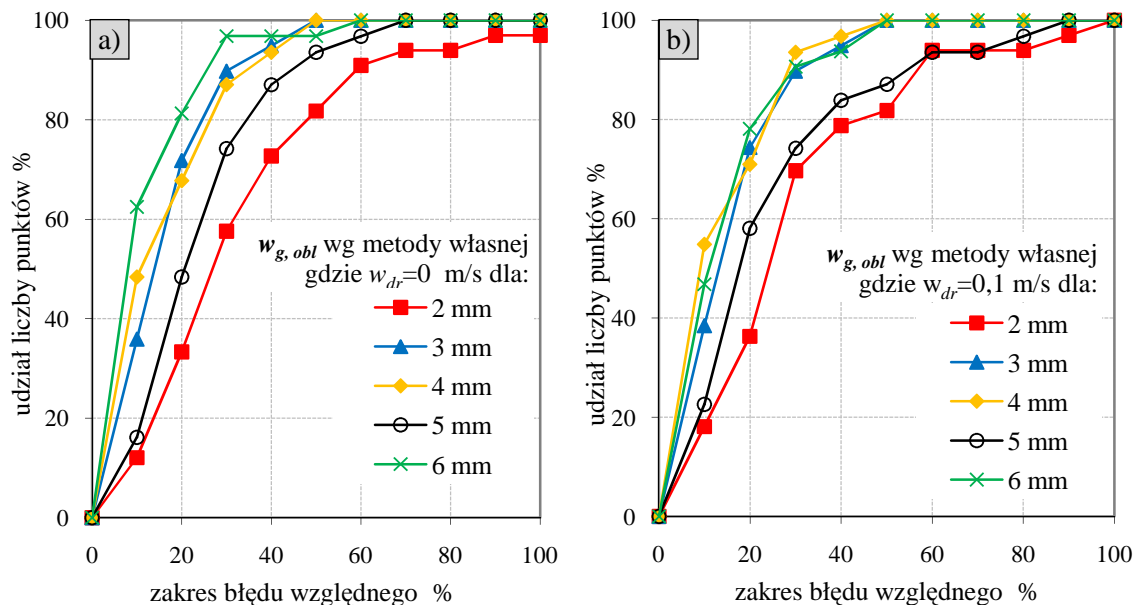
Na Rys. 8.46 przedstawiono wykresy, na których wyniki obliczeń prędkości $w_{g,obl}$ według wyżej wymienionych metod porównano z wartościami zmierzonymi $w_{g,zm}$. Jak wynika z analizy danych na zaprezentowanych wykresach, poszczególne metody różnią się dokładnością obliczeń. Najgorsze rezultaty uzyskano dla metody Chena i innych [10] we wszystkich minikanalach. Wystąpiła duża rozbieżność pomiędzy prędkością zmierzoną i obliczoną w przypadku tej metody, wiele punktów leży poza linią ($\pm 30\%$) określającą błąd względny. Natomiast stosując pozostałe metody uzyskano o wiele lepszą zgodność, większość punktów w zakresie błędu względnego ($\pm 30\%$), z kolei różnice pomiędzy tymi metodami są dość subtelne i trudne do zauważenia gołym okiem.

W następnej kolejności przedstawiono zbiorcze zestawienie rozkładu wartości błędów względnych dla wszystkich minikanalów i wszystkich analizowanych metod (Rys. 8.47). Linie na rysunku wskazują jaki jest udział punktów na określonym poziomie błędu względnego. Można stwierdzić, że metoda Chena i innych [10] charakteryzuje się największym rozkładem błędów, (80% punktów wyznaczonych według tej metody zawiera się w zakresie błędu względnego $\pm 45\%$), to pozostałych metod ponad 80% punktów mieści się w zakresie błędu względnego powyżej 30 %.

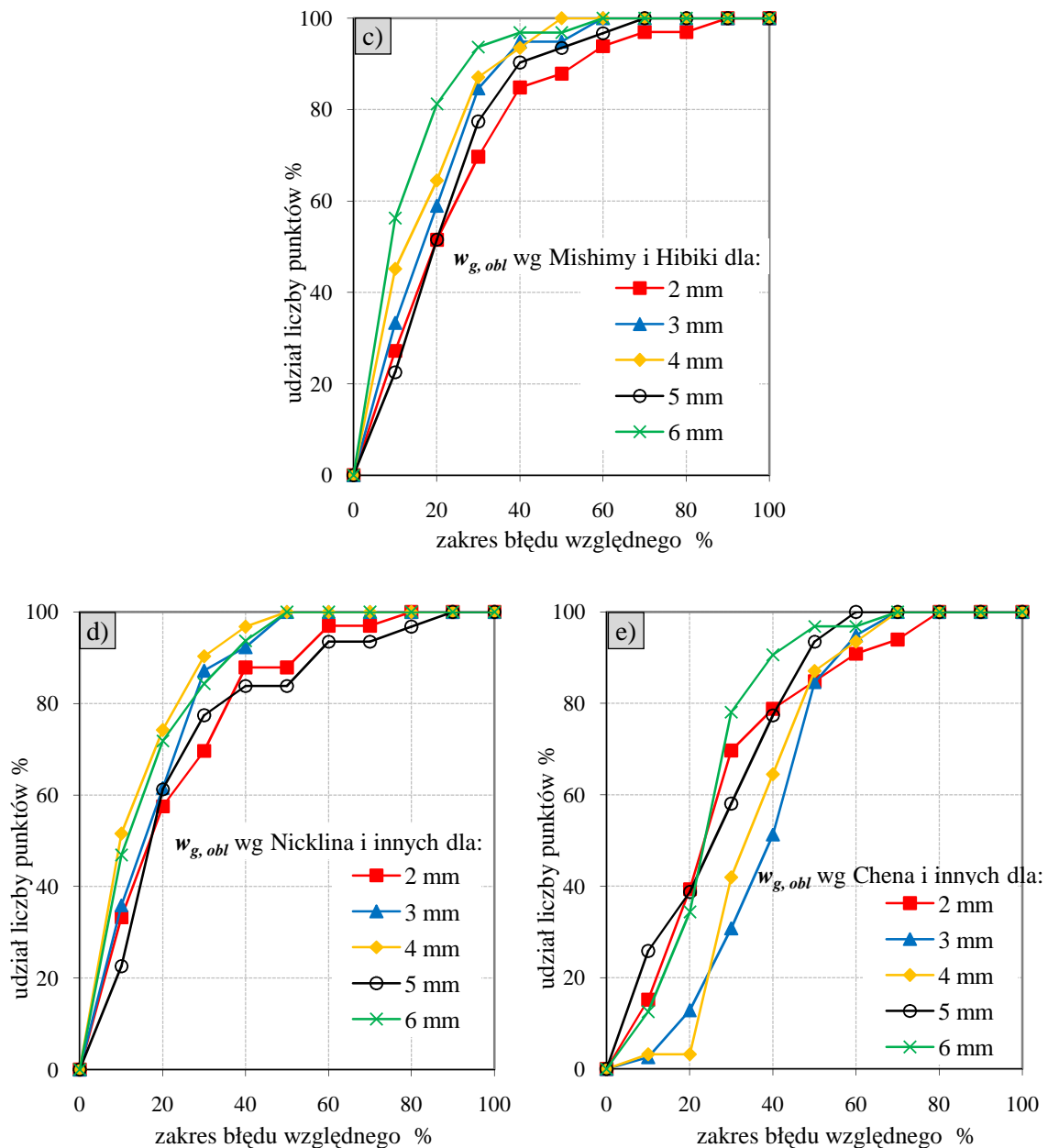


Rys. 8.47. Porównanie dokładności obliczeń prędkości gazu w przepływie dwufazowym w badanych minikanalach wg analizowanych metod (Tabela 8.33)

Dodatkowo postanowiono porównać dokładności obliczeń prędkości gazu wg analizowanych metod w zależności od średnicy minikanалу, co przedstawiono na Rys. 8.48.



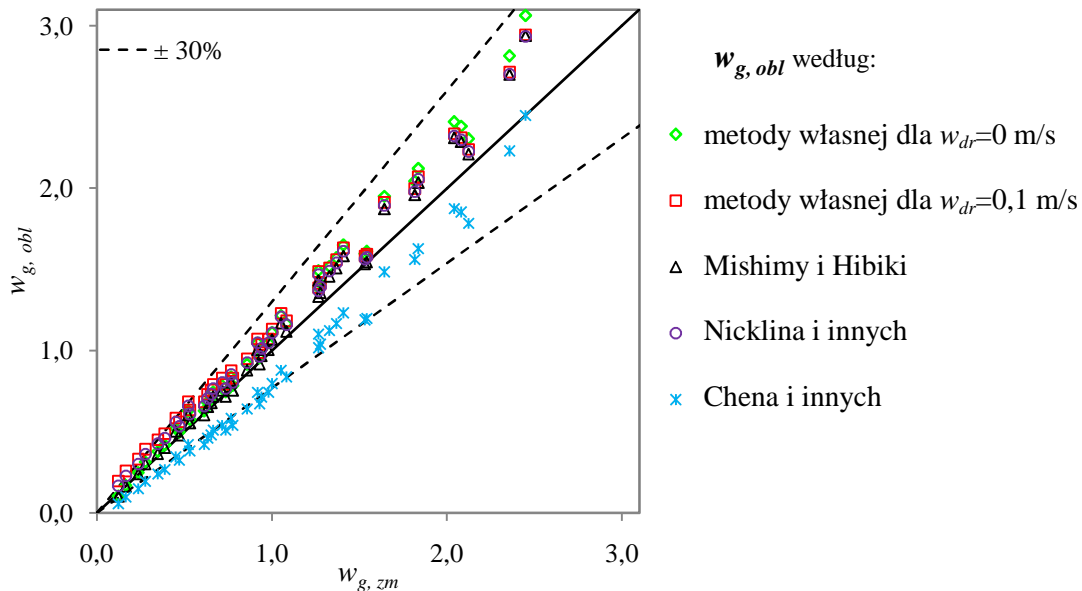
Rys. 8.48. Porównanie dokładności obliczeń prędkości gazu w przepływie dwufazowym zależności od badanej średnicy minikanalów wg metody a) własnej dla $w_{dr}=0$ m/s; b) własnej dla $w_{dr}=0,1$ m/s; c) Mishimy i Hibiki [51]; d) Nicklina i innych [56]; e) Chena i innych [10]



c.d. **Rys. 8.48**

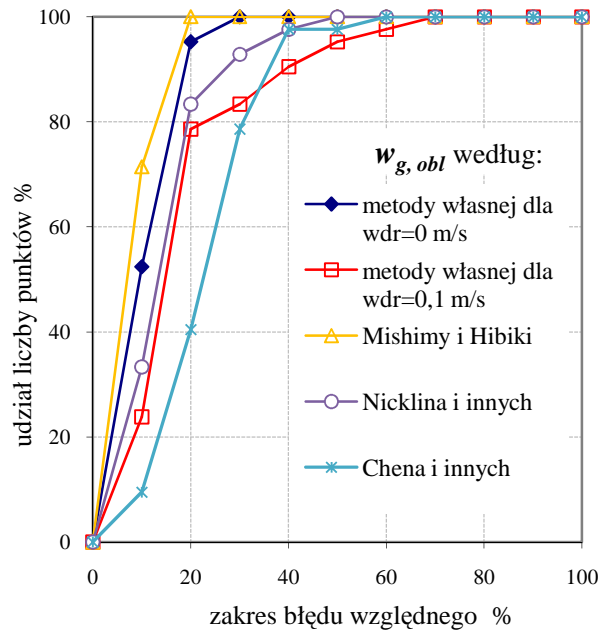
Z przedstawionych na *Rys. 8.48* danych dotyczących porównania zawierającego wyniki analizy statystycznej, określającej udział punktów w poszczególnych zakresach błędu względnego, można zauważyć, że w przypadku wszystkich analizowanych metod najmniejsza zgodność pomiędzy wartością obliczoną prędkości gazu a wyznaczoną podczas przeprowadzonych badań wystąpiła dla minikanalu o $D_h=2$ mm, zaś największa zgodność wystąpiła w minikanale o $D_h=6$ mm.

Dodatkowo dysponując wartościami zmierzonej prędkości gazu w badaniach przeprowadzonych przez Mishimę i Hibiki [51] dla przepływu dwufazowego gaz-ciecz w minikanale o średnicy hydraulicznej 4,08 mm (w sumie 42 punkty), dokonano obliczenia prędkość gazu wg analizowanych metod (Tabela 8.33). Wyniki obliczeń $w_{g,obl}$ porównano wykresie, z wartościami zmierzonymi $w_{g,zm}$ otrzymanymi przez badaczy.



Rys. 8.49. Porównanie wartości zmierzonych prędkości gazu w badaniach przeprowadzonych przez Mishimę i Hibiki [51] obliczonymi wg metod przedstawianych w tabeli 8.33 dla minikanalu o $D_h=4,08$ mm

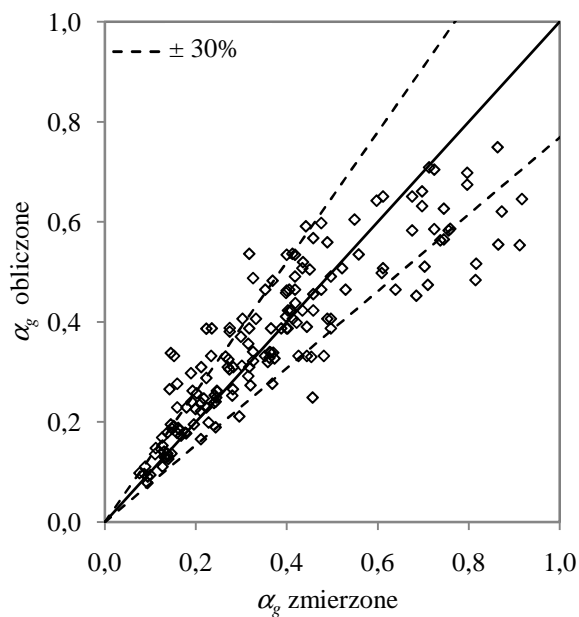
Podobnie jak w przypadku badań własnych, również tutaj największa niezgodność wystąpiła w przypadku zastosowania metody zaproponowanej przez Chena i innych [10], za to największą zgodność otrzymano dla metody Mishimy i Hibiki [51], co wydaje się być oczywiste w powyższym porównaniu. Poniżej na Rys. 8.50 przedstawiono porównanie dokładności obliczeń prędkości gazu wg analizowanych metod dla przepływu w minikanale o $D_h=4,08$ mm z prędkościami zmierzonymi w badaniach Mishimy i Hibiki [51]. Można zauważyć, że metoda własna dla $w_{dr}=0$ m/s daje zaraz po metodzie Mishimy i Hibiki [51] najmniejszy rozkład błędów. Mianowicie 100% punktów wyznaczonych według metody własnej dla $w_{dr}=0$ m/s zawiera się w zakresie błędu względnego $\pm 30\%$, a 80% punktów wykazuje błąd względny na poziomie $\pm 17\%$.



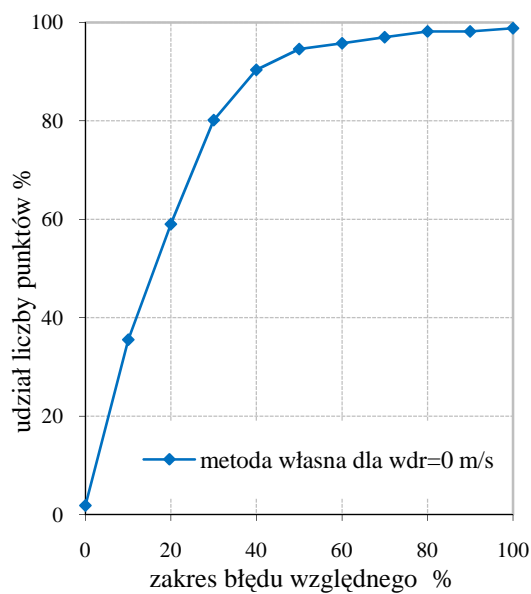
Rys. 8.50. Porównanie dokładności obliczeń prędkości gazu w badaniach przeprowadzonych przez Mishimę i Hibiki [51] dla minikanалу o $D_h=4,08$ mm według analizowanych metod (Tabela 8.33)

Uwzględniając przedstawione rezultaty analiz oraz stwierdzenia zawarte w pracach [21],[30],[51], w których prędkość dryfu w minikanalach wynosi zero, a także lepszy stopień dopasowania funkcji w przypadku określenia nadwyżki współczynnika rozkładu gdy $w_{dr}=0$ m/s, **ostatecznie zaproponowano równanie (8-11)** jako odpowiednie przy obliczaniu współczynnika rozkładu dla przepływu dwufazowego w minikanalach.

Wyznaczone drogą eksperymentalną wartości prędkości struktur rzutowych mogą być dobrą podstawą do obliczenia bardzo ważnego parametru dla opisu hydrodynamiki przepływu dwufazowego - udziału objętościowego fazy. Przy wykorzystaniu modelu poślizgu, wyznaczono udział fazy gazowej α_g (równanie 8-5), który następnie porównano z udziałem objętościowym fazy gazowej obliczonym według wyżej wymienionego modelu przy wykorzystaniu własnej zależności (równanie 8-11), opisującej parametr rozkładu C_0 . Otrzymane wyniki przedstawiono na Rys. 8.51 i Rys. 8.52. 80% punktów mieści się w zakresie błędu względnego ± 30 %, co uważa się za zadawalający wynik.



Rys. 8.51. Porównanie udziału objętościowego obliczonego, ze zmierzonym dla przepływu dwufazowego gaz-ciecz w wszystkich badanych minikanalach

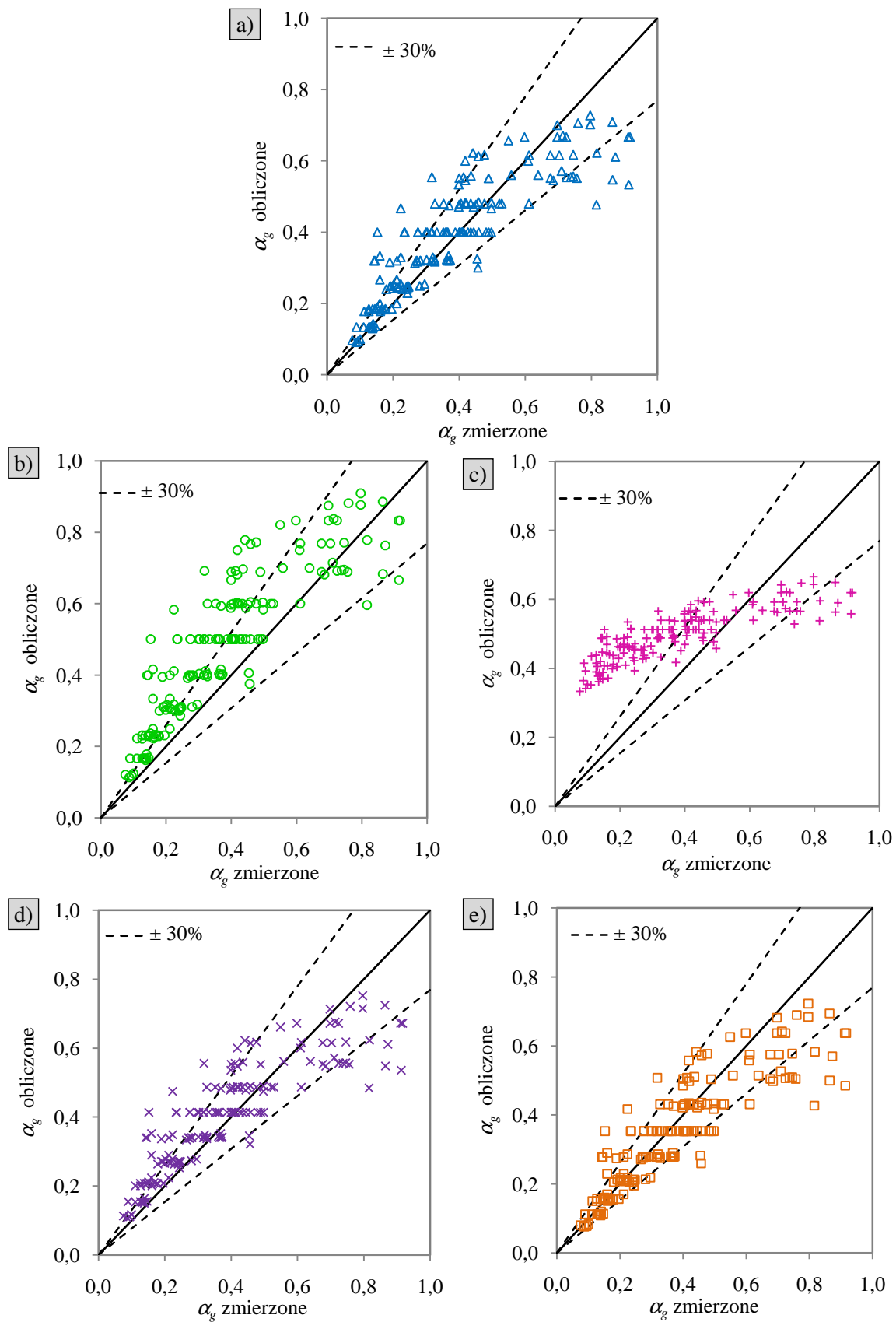


Rys. 8.52. Zestawienie średnich wartości błędów względnych udziału objętościowego gazu dla proponowanej metody własnej obliczania parametru rozkładu

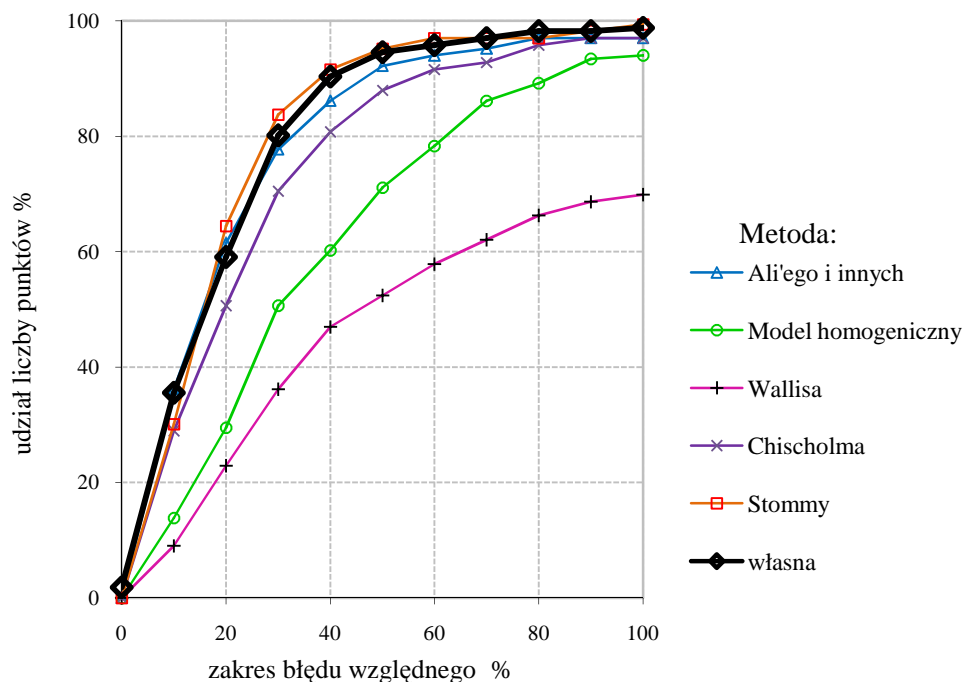
Zdecydowano także przeprowadzić porównanie dokładności metody obliczania udziału objętościowego gazu zaproponowanej w tej pracy z innymi dostępnymi w literaturze metodami (Tabela 8.34). Pierwsza metoda została zaproponowana przez Ali'ego i innych [2] została opracowana dla minikanalów. Kolejne metody były opracowane dla kanałów konwencjonalnych i są reprezentantami różnych grup modeli od homogenicznego poprzez model poślizgu, rozdzielony aż do modelu teoretycznego Stommy [73]. Porównanie dotyczy wartości udziałów objętościowych gazu uzyskanych na drodze eksperymentalnej z wartościami obliczonymi na podstawie wybranych korelacji literaturowych, zastawionych w tabeli 8.34. Na Rys. 8.53 porównano wartości zmierzone udziału objętościowego gazu i obliczone różnymi metodami, zaś na Rys. 8.54 rozkłady błędu względnego.

Tabela 8.34 Metody korelacyjne do obliczania udziału objętościowego gazu

Lp.	Metoda	Charakterystyka metody
1.	Ali'ego i innych [2]	$\alpha_g = 0,8\xi_g$, gdzie $\xi_g = \frac{w_{sg}}{w_{sl} + w_{sg}}$
2.	Model homogeniczny	$\alpha_g = \xi_g$, gdzie $\xi_g = \frac{w_{sg}}{w_{sl} + w_{sg}}$
3.	Wallisa [86] model rozdzielony	$\alpha_g = (1 + X_{LM}^{0,8})^{-0,375}$, gdzie $X_{LM} = \left[\frac{\left(\frac{\Delta p}{L} \right)_l}{\left(\frac{\Delta p}{L} \right)_g} \right]^{0,5}$
4.	Chisholma [12] model poślizgu	$\alpha_g = \frac{1}{1 + S \frac{1-x}{x} \frac{\rho_g}{\rho_l}}$, gdzie $S = \left[x \frac{\rho_l}{\rho_g} + (1-x) \right]^{0,5}$, $x = \frac{\rho_g w_{sg}}{\rho_l w_{sl} + \rho_g w_{sg}}$
5.	Stommy [73] model teoretyczny	$\alpha_g = 1 - \frac{\xi_g^2 - x^2}{2 \left[\ln \frac{1-x}{1-\xi_g} - (\xi_g - x) \right]}$, gdzie $\xi_g = \frac{1}{1 + \frac{1-x}{x} \frac{\rho_g}{\rho_l}}$, $x = \frac{\rho_g w_{sg}}{\rho_l w_{sl} + \rho_g w_{sg}}$



Rys. 8.53. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych obliczonego gazu dla przepływu dwufazowego gaz-ciecz w wszystkich badanych minikanalach z obliczonymi wg modelu: a) Ali'ego i innych [2], b) homogenicznego c) Wallisa [86], d) Chisholma [12], e) Stommy [73]



Rys. 8.54. Zestawienie średnich wartości błędów względnych dla udziałów objętościowych obliczonych wg analizowanych metod (Rys. 8.53) oraz metody własnej

Porównując otrzymane wyniki dla metody własnej z modelem zaproponowanym przez Ali'ego i innych [2] można zauważyć, że porównanie udziałów objętościowych gazu zmierzonych z obliczonymi wypada nieco gorzej od metody własnej. Z rozkładu punktów na wykresie (Rys. 8.54) wynika więc, że opracowane równanie (8-11) zapewnia lepszą dokładność obliczania udziału objętościowego gazu α_g niż model Ali'ego i innych [2].

Porównanie metody własnej zaproponowanej dla minikanalów z różnymi modelami dla kanałów konwencjonalnych wypada na korzyść metody własnej. Tylko dla metody Stommy [73] rozrzut błędu względnego jest porównywalny. Zdecydowanie niekorzystne wyniki otrzymano z porównania danych doświadczalnych z obliczonymi przy wykorzystaniu modelu Chisholma [12], modelu homogenicznego i Wallisa [86], co jest kolejnym argumentem, że przenoszenie metod obowiązujących dla kanałów konwencjonalnych na obszar minikanalów jest ryzykowne.

9. Podsumowanie i wnioski końcowe

W prezentowanej pracy, badano wpływ średnicy minikanalu na hydrodynamikę przepływu mieszaniny gaz-ciecz w przewodach pionowych. Realizując cel pracy dokonano kompleksowej oceny charakteru przepływu, zarówno w ujęciu jakościowym jaki i ilościowym, posługując się metodami opartymi na cyfrowym przetwarzaniu obrazów uzyskanych z rejestracji przepływów za pomocą kamery o równocześnie wysokiej rozdzielczości jak i częstotliwości próbkowania obrazu.

Na podstawie przeprowadzonych studiów literaturowych dotyczących analizy stanu wiedzy w zakresie przepływu mieszaniny dwufazowej w minikanalach oraz wyników badań własnych hydrodynamiki przepływu wznoszącego gaz-ciecz w minikanalach o średnicy hydraulicznej od 2 do 6 mm, sformułowano następujące wnioski:

- geometria minikanalu nie ma istotnego wpływu na zakresy występowania poszczególnych struktur przepływu dwufazowego,
- zaproponowano mapę przepływu dwufazowego w minikanalach (Rys. 8.37),
- istnieje możliwość przewidywania struktur przepływu dwufazowego w minikanalach z dobrą skutecznością, na poziomie 86%,
- model poślizgu Zuber – Findlaya [102] umożliwia obliczanie prędkości rzeczywistej fazy gazowej oraz zawartości faz,
- zaproponowano zależność do obliczania rzeczywistej prędkości gazu (8-11) dla której przy założeniu braku poślizgu $w_{dr}=0$ m/s, istnieje wpływ średnicy minikanalu na parametr rozkładu C_0 ,
- do określenia udziału objętościowego gazu w przepływie wznoszącym w minikanalach proponuje się model poślizgowy Zuber – Findlaya [102], a parametr rozkładu oblicza się z zależności (8-11) przy założeniu braku prędkości poślizgu. Stosunkowo dobre wyniki zapewnia także model Stommy [73].

10. Literatura

- [1] AKBAR M.K., PLUMMER D.A., GHIAASIAAN S.M.: On gas–liquid two-phase flow regimes in microchannels, *Int. J. Multiphase Flow* 29, 855–865, 2003
- [2] ALI M., SADATOMI M., KAWAJI M.: Adiabatic two-phase flow in narrow channels between two flat plates, *Canadian Journal of Chemical Engineering* 71 (5), 657–666, 1993
- [3] ANWEILER S.: Ocena struktur dwufazowych w aparatach fluidalnych, *Rozprawa doktorska, Politechnika Opolska, Opole* 2004
- [4] BARAJAS A.M., PANTON R.L.: The effect of contact angle on two-phase flow in capillary tubes. *Int. J. Multiphase Flow* 19, 337–346, 1993
- [5] BARNEA D., LUNINSKI Y., TAITEL Y.: Flow pattern in horizontal and vertical two phase flow in small diameter pipes, *Can. J. Chem. Eng.* 61(5), 617–620, 1983
- [6] BENDAT J.S., PIERSOL A.G.: *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*, PWN, Warszawa 1976
- [7] BRANDNER J.J., ANURJEW E., BOHN L., HANSJOSTEN E., HENNING T., SCHYGULLA U., WENKA A., SCHUBERT K.: Concepts and realization of microstructure heat exchangers for enhanced heat transfer, *Experimental Thermal and Fluid Science* 30, 801–809, 2006
- [8] BRAUNER N., MOALEM-MARON D.: Identification of the range of small diameter conduits, regarding two-phase flow pattern transition, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 19, 29–39, 1992
- [9] CHEN L., TIAN Y.S., KARAYIANNIS T.G.: The effect of tube diameter on vertical two – phase flow regimes in small tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49, 4220–4230, 2006
- [10] CHEN W.L., TWU M.C., PAN C.: Gas–liquid two-phase flow in micro-channels, *International Journal of Multiphase Flow* 28, 1235–1247, 2002
- [11] CHENG L., MEWES D.: Review of two-phase flow and flow boiling of mixtures in small and mini channels, *International Journal of Multiphase Flow* 32, 183–207, 2006
- [12] CHISHOLM D.: Theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 10, 1767-1778, 1967
- [13] CLAYTON T. CROWE, *Multiphase Flow Handbook*, CRC Press, s.11–2, 2006
- [14] COLEMAN J. W., GARIMELLA S.: Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 2869–2881, 1999
- [15] DAMIANIDES C.A., WESTWATER J.W.: Two-phase flow patterns in a compact heat exchanger and in small tubes. In: *Proc. Second UK National Conf. on Heat Transfer*, Glasgow, 14–16 September, Mechanical Engineering Publications, London, 1257–1268, 1988

- [16] DUTKOWSKI K., BOHDAL T.: Wybrane aspekty stanu wiedzy o minikanalach, *Chłodnictwo* nr 1-2, 16-22, 2008
- [17] DUTKOWSKI K.: Two-phase pressure drop of air–water in minichannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52, 5185–5192, 2009
- [18] DZIUBIŃSKI M., PRYWER J.: *Mechanika płynów dwufazowych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2009
- [19] DZIUBIŃSKI M.: *Hydrodynamika przepływu mieszanin dwufazowych gaz–ciecz*, Politechnika Łódzka, Monografie 2005
- [20] DZIUBIŃSKI M.: Modelowanie przepływów wielofazowych w mikrokanalach, *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 48, Nr 6, 2009
- [21] FUKANO T., KARIYASAKI A.: Characteristics of gas-liquid two-phase flow in a capillary, *Nucl. Engng. Des.* 141, 59–68, 1993
- [22] FURUKOWA T., FUKANO T.: Effects of liquid viscosity on flow patterns in vertical upward gas-liquid two-phase flow, *International Journal of Multiphase Flow* 27, 1109 – 1126, 2001
- [23] GHIAASIAAN S.M., ABDEL-KHALIK S.I.: Two-phase flow in microchannels, *Advanced Heat Transfer* 34, 145-254, 2000
- [24] GNUTEK Z., NEMŚ A.: Tendencje rozwoju maszyn i urządzeń energetycznych w erze miniaturyzacji, *XX Zjazdu Termodynamików*, Wrocław, tom I, 318–324, 2008
- [25] GUZIAŁOWSKA J.: *Badanie przepływu mieszaniny gaz – ciecz w wymienniku z przegrodami*, Rozprawa doktorska, Politechnika Opolska, Opole 2008
- [26] HARRIS C., DESPA M., KELLY K. K.: Design and fabrication of a cross flow microheat exchanger, *J. Micromech. Syst.* 9, 502–508, 2000
- [27] HASSAN I., VAILLANCOURT M., PEHLIVAN K.: Experimental study on two-phase flow and pressure drop in millimeter-size channels, *Applied Thermal Eng.* 26, 1509-1514, 2006
- [28] HASSAN I., VAILLANCOURT M., PEHLIVAN K.: Two-phase flow regime transitions in microchannels: a comparative experimental study, *Microscale Thermophys. Eng.* 9, 165-182, 2005
- [29] <http://w.w.w.nauka.gov.pl>
- [30] IDE H., KARIYASAKI A., FUKANO T.: Fundamental data on the gas–liquid two-phase flow in minichannels, *International Journal of Thermal Sciences* 46, 519–530, 2007
- [31] KANDLIKAR S. G.: Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels, *Exp. Thermal and Fluid Science* 26, 389–407, 2002
- [32] KANDLIKAR S.G., GRANDE W. J.: Evolution of microchannel flow passages – thermohydraulic performance and fabrication technology, *Proceedings of IMECE 2002 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition* November 17-22, New Orleans, Louisiana, 2002

- [33] KARIYASAKI A., FUKANO T., OUSAKA A., KAGAWA M.: Isothermal air-water two-phase up- and downward flows in a vertical capillary tube (1st report, Flow pattern and void friction), *Trans. JSME* 58, 2684–2690, Japan, 1992
- [34] KAWAJI M., CHUNG P. M. –Y., KAWAHARA A.: Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel, *International Journal of Multiphase Flow* 28, 1411–1435, 2002
- [35] KAWANO K., MINAKAMI K., IWASAKI H, ISHIZUKA M.: Microchannel heat exchanger for cooling electrical equipment, *HTD-Vol. 261/PID-Vol. 3, Proceedings of the ASME HTD* 3, 173–180, 1998
- [36] KEW P.A., CORNWELL K.: Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small diameter channels. *Appl. Thermal Engineering* 17, 705–715, 1997
- [37] KIM D-K., KIM S. J.: Averaging approach for microchannel heat sinks subject to the uniform wall temperature condition, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer* 49, 695–706, 2006
- [38] KOZULIN I.A., KUZNETSOV V.V.: Statistic characteristics of the gas-liquid flow in a vertical minichannel, *Thermophysics and Aeromechanics* 17, Nr. 1, 2010
- [39] KRÓTKIEWICZ M., ULBRICH R.: Application of dynamic image system for determining multiphase flow, *XIII International Conference on System Science, Wrocław 1998*
- [40] KRÓTKIEWICZ M., ULBRICH R.: Zastosowanie metod rozpoznawania obrazów do klasyfikacji dynamicznych procesów przepływu dwufazowego, *Komputerowa analiza obrazu w technologii żywności, Olsztyn 1994*
- [41] KRÓTKIEWICZ M.: Rozpoznawanie obiektów w zastosowaniach inżynierii procesowej i mechanoskopii, *Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2001*
- [42] KUHCZYŃSKA A.: Warunki pracy aparatu ze wznoszącym i opadającym przepływem dwufazowym gaz-ciecz, *rozprawa doktorska, Politechnika Opolska, Opole 2010*
- [43] KUMAR P.: Numerical Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer in Microchannel, *Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology Rourkela, 2009*
- [44] LANGMAN E.: Ekoprojektowanie – prezentacja idei i regulacji prawnych. *Chłodnictwo i Klimatyzacja, nr 1-2, 74-80, 2007*
- [45] LIN S., KEW P. A., CORNWELL K.: Characteristics of air/water flow in small tubes, *International Journal of Heat Technol.* 17, 63–70, 1999
- [46] LUO L., FAN Z., GALL H., ZHOU X., YUAN W.: Experimental study of constructal distributor for flow equidistribution in a mini crossflow heat exchanger (MCHE), *Chemical Engineering and Processing* 47, 229–236, 2008
- [47] MAGNUCKI K.: Wytrzymałość i optymalizacja zbiorników cienkościennych, *Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, Poznań 1998*

- [48] MCQUILLAN K.W., WALLEY P.B.: Flow patterns in vertical two-phase flow, *International Journal of Multiphase Flow* 11, 2, 161-175, 1985
- [49] MEHENDALE S.S., JACOBI A.M., SHAH R.K.: Fluid flow and heat transfer at micro- and meso-scales with applications to heat exchanger design, *Appl. Mech. Rev.* 53,175-193, 2000
- [50] MISHIMA K., HIBIKI T.: Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical narrow rectangular channel, *Nuclear Engineering and Design* 203, 117–131, 2001
- [51] MISHIMA K., HIBIKI T.: Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes, *International Journal of Multiphase Flow* 22, 703–712, 1996
- [52] MISHIMA K., ISHII M.: Flow regime transition criteria for upward two- phase flow in vertical tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 27 (5), 1984, 723–737
- [53] MOREL C, RUYER P., SEILER N., LAVIÉVILLE J. M.: Comparison of several models for multi-size bubbly flows on an adiabatic experiment, *International Journal of Multiphase Flow* 36, 25–39, 2010
- [54] MROZEK B., MROZEK Z.: *Matlab i Simulink – poradnik użytkownika*, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2004
- [55] NICKLIN D. J., DAVIDSON J. F.: The onset of instability on two-phase slug flow, *Inst. Mech. Eng, Symposium Two-Phase Flow, Paper 4*, 1962
- [56] NICKLIN D.J., WILKE J.O., DAVIDSON J.F.: Two-phase flow in vertical tubes, *Trans. Inst. Chem. Eng.* 40 (1), 61–68, 1962
- [57] OTNES R.K., ENOCHSON L.: *Analiza numeryczna przebiegów czasowych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978
- [58] OYA T.: Upward liquid flow in small tube into which air streams (1st report, Experimental apparatus and flow patterns) 14, 78, 1320–1329, 1971
- [59] PETTERSEN J., HAFNER A., SKAUGEN G., REKSTAD H., Development of compact heat exchangers for CO₂ air-conditioning systems, *Int. J. Refrig.* 21, 180–193, 1998
- [60] PETTIGREW M.J., TAYLOR C.E.: Vibration analysis of shell-and-tube heat exchangers: an overview-Part 1: flow, damping, fluidelastic instability, *Journal of Fluids and Structures* 18, 469–483, 2003
- [61] PRIMAL F., LUNDQVIST P.: Refrigeration systems with minimized refrigerant charge: system design and performance, *Proc. IMechE 219 Part E: J. Process Mechanical Engineering*, 2005
- [62] PYKA I.: *Nierównomierność rozptywu mieszaniny dwufazowej gaz-ciecz w aparatach wielorurowych*, Rozprawa doktorska, Politechnika Opolska, Opole 2007

- [63] RACHEL M., MIŁASZEWICZ B., ULBRICH R.: The effect of channel diameter on occurrence of two-phase gas-liquid flow structures, VIII Warsztaty modelowanie przepływów wielofazowych w układach termochemicznych, Wieżyca 2009
- [64] RACHEL M., MIŁASZEWICZ B., ULBRICH R.: Wpływ średnicy kanału na struktury przepływu dwufazowego gaz-ciecz w minikanalach, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, rok 48 (40), Nr 6/2009
- [65] RACHEL M., MIŁASZEWICZ B., ULBRICH R.: Wpływ średnicy kanału na zakres występowania struktur przepływu dwufazowego gaz-ciecz, Politechnika Opolska, Zeszyty Naukowe – Inżynieria Środowiska z. 7, Nr 331/2009
- [66] REVELLIN R., THOME J.R.: Adiabatic two-phase frictional pressure drops in microchannel, Experimental Thermal and Fluid Science 31, 673-685, 2007
- [67] SAISORN S., WONGWISES S.: The effects of channel diameter on flow pattern, void fraction and pressure drop of two-phase air–water flow in circular microchannels, Experimental Thermal and Fluid Science 34, 454–462, 2010
- [68] SHAH R. K.: Classification of heat exchangers, Heat exchanger: Thermal Hydraulic Fundamental and Design. Hemisphere Publishing Corp., Washington DC, p. 9-46, 1986
- [69] SHAH R.K., SEKULIC D.P.: Fundamentals of Heat Exchanger Design, John Wiley&Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003
- [70] SHAO N., GAVRIILIDIS A., ANGELI P.: Flow regimes for adiabatic gas–liquid flow in microchannels, Chemical Engineering Science 64, 2749–2761, 2009
- [71] SIM W. G., BAEL B. M., MUREITHI N. W.: An experimental study on characteristics of two-phase flows in vertical pipe, Journal of Mechanical Science and Technology 24, 1981–1988, 2010
- [72] STACHURSKI M.: Metody numeryczne w programie Matlab, Wydawnictwo Mikom, Warszawa 2003
- [73] STOMMA Z.: Two phase flows – void fraction values determination, Instytut Badań Jądrowych, 1818/IX/R/A, 1979
- [74] SUO M., GRIFFITH P.: Two-phase flow in capillary tubes, Journal of Basic Engineering 86, 576, 1964
- [75] Tablice do obliczeń procesowych pod red. Leona Troniewskiego, Politechnika Opolska, Skrypt nr 227, 2006
- [76] TAITEL Y., BARNEA, D. DUKLER A.E.: Modeling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes, AIChE Journal 26, Nr. 3, 1980, 345–354, 1980
- [77] TAKEUCHI Y., PARK C., NOBORIO K., YAMAMOTO Y., KONISHI S.: Heat transfer in SiC compact heat exchanger, Fusion Engineering and Design 85, 1266–1270, 2010

- [78] TRIPLETT K.A., GHIAASIAAN S.M., ABDEI-KHALIK S.I., LEMOUEL A., MCCORD B.N: Gas-liquid two-phase flow in micro-channels, Part II: void fraction and pressure drop, *International Journal of Multiphase Flow* 25, 395–410, 1999
- [79] TRIPLETT K.A., GHIAASIAAN S.M., ABDEI-KHALIK S.I., SADOWSKI D.L.: Gas-liquid two-phase flow in micro-channels, Part I: two-phase flow patterns, *International Journal of Multiphase Flow* 25, 377–394, 1999
- [80] TRONIEWSKI L., ULBRICH R.: Wyższa Szkoła Inżynierska, *Mechanika* 102, z. 37, Opole 1984
- [81] TSOLIGKAS A.N., SIMMONS M.J.H., WOOD J.: Influence of orientation upon the hydrodynamics of gas-liquid flow for square channels in monolith supports *Chemical Engineering Science* 62, 4365–4378, 2007
- [82] ULBRICH R., TRONIEWSKI L.: Two-phase gas-liquid flow in rectangular channels, *Chem. Eng. Sci.* 39, 751–765, 1984
- [83] ULBRICH R.: Identyfikacja przepływu dwufazowego gaz-ciecz, *Studia i Monografie, Wyższa Szkoła Inżynierska*, z. 32, Opole 1989
- [84] ULBRICH R.: Spadek ciśnienia przy przepływie mieszaniny gaz-ciecz w przestrzeni międzyrurowej, *Studia i Monografie, Politechnika Opolska*, z. 89, Opole 1996
- [85] WAELCHLI S., RUDOLF VON ROHR P.: Two-phase flow characteristics in gas-liquid microreactors, *International Journal of Multiphase Flow* 32, 791–806, 2006
- [86] WALLIS G.B.: *One-Dimensional Two-Phase Flow*, McGraw-Hill, New York, 1969
- [87] WANG H., PETERSON R. B.: Performance enhancement of a thermally activated cooling system using microchannel heat exchangers, *Industrial and Manufacturing Engineering*, Oregon State University Corvallis, OR 97331, USA, 2011
- [88] WENGEL M., ULBRICH R.: Badanie struktur przepływu dwufazowego w zależności od średnicy minikanału, *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, s. 117-118, Nr 3/2010
- [89] WENGEL M.: Badanie hydrodynamiki przepływu dwufazowego gaz-ciecz w minikanalach, *Politechnika Opolska, Zeszyty Naukowe – Inżynieria Środowiska* z. 8, Nr 339/2010
- [90] WENGEL M.: Funkcja gęstości prawdopodobieństwa jako narzędzie w rozpoznawaniu struktur przepływu dwufazowego w minikanalach, *IV Środowiskowe Warsztaty Doktorantów, Zeszyty Naukowe – Mechanika*, z.96, Nr 334/2010
- [91] WENGEL M.: Model poślizgu faz w minikanalach, *V Środowiskowe Warsztaty Doktorantów, Zeszyty Naukowe – Mechanika*, z.98, Nr 341/2011,
- [92] WÖLK G., DREYER M., RATH H.J.: Flow pattern in small diameter non-circular channels, *International Journal of Multiphase Flow* 26, 1037–1061, 2000
- [93] WONGWISES S., DISAWAS S., KAEWON J., ONURAJ C.: Two-phase evaporative heat transfer coefficients of refrigerant HFC-134a under forced flow

conditions in a small horizontal tube. *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 27, 35–48, 2000a

- [94] XU J. L., CHENG P., ZHAO T.S.: Gas–liquid two-phase flow regimes in rectangular channels with mini/micro gaps, *International Journal of Multiphase Flow* 25, 411–432, 1999
- [95] YANG C-Y., SHIEH C-C.: Flow pattern of air-water two-phase R-134a in small circular tubes, *Int. Journal of Multiphase Flow* 27, 1163–1177, 2001
- [96] YUE J., LUO L., GONTHIER Y., CHEN G., YUAN Q.: An experimental investigation of gas–liquid two-phase flow in single microchannel contactors, *Chemical Engineering Science* 63, 4189 – 4202, 2008
- [97] ZAJĄC D., ULBRICH R.: Nieinwazyjne metody badań przepływów dwufazowych gaz-ciecz, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole*, 2005
- [98] ZAJĄC D.: Badanie przepływu mieszaniny dwufazowej gaz-ciecz w kolumnie pęcherzykowej z zastosowaniem metod cyfrowej analizy obrazu, *Rozprawa doktorska, Politechnika Opolska, Opole*, 2004
- [99] ZHAO J.F., XIE J.C., LIN H., HU W.R., IVANOV A.V., BELYAEV A.Y.: Experimental studies on two-phase flow patterns aboard the Mir space station, *Int. Journal of Multiphase Flow* 27, 1931–1944, 2001
- [100] ZHAO T.S., BI Q.C.: Co-current air-water two-phase flow patterns in vertical triangular microchannels, *International Journal of Multiphase Flow* 27, 765–782, 2001
- [101] ZIELIŃSKI T.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów – od teorii do zastosowań*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2005
- [102] ZUBER N., FINDLAY J. A.: Average volumetric concentration in two-phase flow systems, *J. Heat Transfer, Trans. ASME* 87, 453–468, 1965