

POLITECHNIKA OPOLSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
KATEDRA INŻYNIERII ŚRODOWISKA



IDENTYFIKACJA PROCESÓW TRANSPORTU
PRZY PRZEPLYWIE MIESZANINY DWUFAZOWEJ
WOKÓŁ PEKU RUR

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Marcin Karaś

Promotor: prof. dr hab. inż. Roman Ulbrich

OPOLE 2014

Spis treści

1.	Wprowadzenie.....	6
2.	Studia literaturowe w zakresie przepływu dwufazowego przez pęk rur.	9
2.1.	Badania nad strukturami przepływu.	10
2.2.	Wykorzystanie techniki DPIV.....	18
2.3.	Wykorzystanie metody elektrochemicznej.....	23
3.	Projektowanie płaszczowo-rurowych wymienników ciepła.	27
3.1.	Dane obliczeniowe.	32
3.2.	Obliczenia dla przepływu wewnątrz rur.....	34
3.3.	Obliczenia dla przepływu w przestrzeni międzyrurowej.	35
3.4.	Podsumowanie.....	41
4.	Opis metod badawczych.....	42
4.1.	Wprowadzenie.....	42
4.2.	Cyfrowa Anemometria Obrazowa DPIV	45
4.3.	Pomiar współczynnika wymiany masy z zastosowaniem metody elektrolitycznej	48
5.	Cel i zakres pracy	53
6.	Stanowisko pomiarowe	54
6.1.	Obieg właściwy	54
6.2.	Tor optyczny.....	57
6.3.	Układ elektryczny.....	58
6.4.	Właściwości układu oksydacyjno – redukcyjnego	59
7.	Koncepcja i metodyka badań i obliczeń.....	60
8.	Opracowanie wyników badań – metoda elektrochemiczna.....	66
9.	Wyznaczenie współczynnika wnikania ciepła dla pęku rur metodą VDI	68
10.	Wyniki badań – wykonanych metodą DPIV	72
11.	Wyniki badań wykonanych metodą elektrochemiczną	100

12. Analiza wyników.....	109
12.1. Porównanie Nu wyznaczonych eksperymentalnie z obliczonymi.....	109
12.2. Analiza wyników – Metoda DPIV	113
12.3. Analiza wyników – metoda Elektrochemiczna	118
12.4. Korelacje pomiędzy charakterem przepływu a wymianą ciepła	123
13. Wnioski	124
14. Bibliografia.....	125

Wykaz oznaczeń.

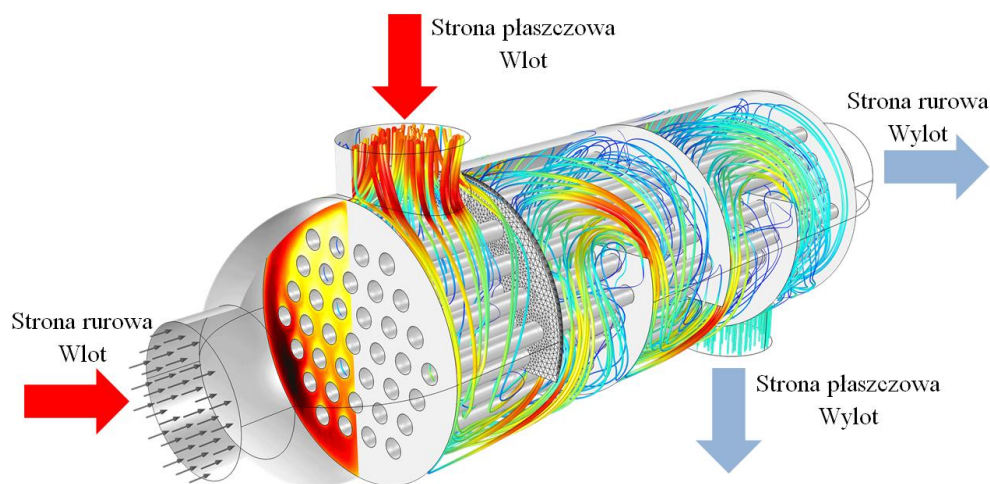
- A - pole powierzchni katody [m^2]
- a - stosunek poprzecznej podziałki rur do ich średnicy [-]
- b - stosunek wzdłużnej podziałki rur do ich średnicy [-]
- C - molowe stężenie jonów w elektrolicie [mol/dm^3]
- C_b - molowe stężenie jonów w masie elektrolitu [mol/dm^3]
- C_s - molowe stężenie jonów na powierzchni elektrody [mol/dm^3]
- D - współczynnik dyfuzji jonów [m^2/s]
- d_0 - średnica rur [m]
- f - stosunek maksymalnej do minimalnej wartości Nu [-]
- F - stała Faradaya [As/kmol]
- F_{min} - najmniejsze pole przekroju przestrzeni międzyrurowej [m^2]
- f_A - współczynnik układu rur [-]
- $f_{Nu_{max}}$ - współczynnik asymetrii maksymalnej [%]
- $f_{Nu_{sr}}$ - współczynnik asymetrii maksymalnej [%]
- $f_{S,P}$ - powierzchniowy udział strefy stagnacji [%]
- $f_{S,O}$ - obwodowy udział strefy stagnacji [%]
- h_D - średni współczynnik wymiany masy przy powierzchni katody [m/s]
- h_H - średni współczynnik przejmowania ciepła [$W/(m^2K)$]
- i - gęstość natężenia prądu [A/m^2]
- I_p - natężenie prądu plateau [A]
- l - charakterystyczny wymiar liniowy [m]
- n - elektronowość reakcji elektrodowej [-]
- N - gęstość strumienia jonów uczestniczących w procesie [$kmol/(m^2/s)$]
- n_R - liczba rzędów rur [-]

Nu	- liczba Nusselta [-]
Pr	- liczba Prandtla [-]
R	- uniwersalna stała gazowa [J/mol·K]
Re	- liczba Reynoldsa [-]
S_1	- poprzeczna podziałka rur [m]
S_2	- wzdłużna podziałka rur [m]
Sc	- liczba Schmidta [-]
St_H	- liczba Stanton dla wymiany ciepła [-]
St_M	- liczba Stanton dla wymiany masy [-]
T	- temperatura [K]
\dot{V}	- strumień objętościowy [m ³ /s]
w	- prędkość przepływu [m/s]
δ	- średnia grubość dyfuzyjnej warstwy Nernsta [m]
ε_D	- dodatkowa dyfuzyjność jonów w warstwie dyfuzyjnej elektrolitu, [m ² /s]
ε_Φ	- dodatkowa dyfuzyjność jonów w polu elektrycznym elektrolitu, [m ² /s]
η	- dynamiczny współczynnik lepkości [kg/m s]
σ_{max}	- odchylenie maksymalne [-]
σ_{max}	- odchylenie średnie [-]
ν	- kinematyczny współczynnik lepkości [m ² /s]
ρ	- gęstość [kg/m ³]
Φ	- potencjał elektryczny w elektrolicie [-]
ψ	- współczynnik stref stagnacji [-]

1. Wprowadzenie

Kończące się zasoby paliw kopanych, konieczność dbania o środowisko, czy coraz większy nacisk na maksymalizację zysków w przemyśle to czynniki zmuszające nas do możliwie najefektywniejszego wykorzystywania pozyskanej energii. Efektywność ta wzrasta między innymi dzięki ciągłemu rozwojowi nauk technicznych, w tym budowy i eksploatacji maszyn, inżynierii procesowej i materiałowej. Dąży się do osiągnięcia maksymalnych efektów procesowych przy minimalizacji kosztów wykonania aparatu. To stawia nowe wyzwania przed inżynierami zarówno na etapie projektowania jak i konstruowania aparatu. w wielu gałęziach przemysłu od produkcji żywności, leków, a skończywszy na energetyce, wykorzystuje się wiele urządzeń takich jak wymienniki ciepła, absorbery, czy kolumny destylacyjne, których rozmiary są określone przez obliczenia procesowe. Niejednokrotnie skomplikowany charakter procesów przebiegających w urządzeniach powoduje trudność optymalnego doboru urządzenia.

Przepływ poprzeczny do pęku rur występuje w wymiennikach płaszczowo-rurowych z zamontowanymi przegrodami którego przykład ilustruje rysunek 1-1. Rozwiązanie to stosuje się gdy współczynnik wnikania ciepła płynu po stronie międzyrurowej jest znacznie niższy w porównaniu z płynem przepływającym wewnątrz rur.



Rysunek 1-1. Wymiennik ciepła płaszczowo-rurowy z segmentowymi przegrodami poprzecznymi [25]

Przegrody ustawione prostopadle do osi wzdłużnej wymiennika zmniejszają pole przekroju przestrzeni międzyrurowej, oraz zmieniają kierunek przepływu płynu poprzecznie do pęku

rurek. Rezultatem jest zwiększenie prędkości i burzliwości strugi przepływającego płynu co prowadzi do intensyfikacji wnikania ciepła.

Przepływy dwufazowe gaz – ciecz również występują w wymiennikach płaszczowo-rurowych, najczęściej w procesach w trakcie których dochodzi do przemiany fazowej. Wymienniki tego typu stosowane są jako kotły, generatory pary, chłodnice, czy rekuperatory. Stosowane są też w połączeniu z kolumnami barbotażowymi w których podczas reakcji chemicznej należy odebrać, lub dostarczyć ciepło. Proces wrzenia na pęku rur występuje w wielu aparatach przemysłowych, takich jak wyparki, warniki czy parowniki zalane. Wrzenie pojawia się także w parownikach chłodziarek absorpcyjnych, wykorzystywanych w układach poligeneracyjnych, jednocześnie wytwarzających energię cieplną, elektryczną oraz dodatkowo chłód, otrzymywany dzięki chłodziarce [24].

W zależności od wielkości strumieni doprowadzanych faz, oraz od ich właściwości fizykochemicznych, lub parametrów wrzenia, formują się różne struktury przepływu. Duża liczba nowo wydawanych publikacji z tego zakresu pokazuje, że badania przepływu dwufazowego są wciąż w kręgu zainteresowań badaczy. Jest to również spowodowane faktem, że pomimo wielu badań nad strukturami przepływu dwufazowego, ich charakter nie został jeszcze w pełni poznany. **Rodzaj struktur przepływu z pewnością ma wpływ na intensywność wymiany ciepła, jednak nie ma badań jednoznacznie opisujących bezpośrednio ten związek.**

Procesy transportu występujące w aparatach z pękiem rur w związku z faktem oddzielenia poszczególnych płynów przegrodami w postaci ścian rurek, dotyczą zwykle transportu ciepła. Mechanizm transportu ciepła w aparatach przemysłowych to przenikanie ciepła, najczęściej łączy w sobie trzy sposoby przekazywania ciepła: przewodzenie, konwekcję, rzadziej promieniowanie. Badania dla układów wielofazowych wymagają zastosowania metod bezinwazyjnych. Procesy wnikania masy mogą być wykorzystane w badaniach wymienników z pękiem rur. Stosując analogię wnikania masy i ciepła można zastąpić bezpośredni pomiar wnikania ciepła w przypadkach gdy jest to nie możliwe do wykonania, lub jest nieopłacalne.

Płaszczowo-rurowe wymienniki ciepła odgrywają podstawową rolę wśród aparatów do wymiany ciepła. Zadaniem projektantów tych urządzeń jest zaprojektowanie go w taki sposób aby w danej objętości przekazały jak najwięcej ciepła, jednocześnie będąc niezawodnymi przez wiele lat eksploatacji, oraz konkurencyjnymi cenowo w fazie produkcji i ich sprzedaży.

Obecnie projektanci dysponują zaawansowanym oprogramowaniem które pozwala na optymalny dobór tych urządzeń dla większości procesów wymiany ciepła. Oprogramowanie to bazuje na znanych w literaturze metodach obliczeniowych przy czym o wiele lepiej znane i opisane są korelacje opisujące przepływy ciepła w układach jednofazowych. Dla takich też układów dostępne oprogramowanie pozwala na obliczenia z dużo większą dokładnością niż w przypadku układów dwufazowych. Dalsze badania prowadzące do lepszego poznania charakteru przepływów dwufazowych pomogą w usprawnieniu sposobów doborów parametrów cieplnych i przepływowych wymienników ciepła. Dzięki temu będzie można projektować je dokładniej, z mniejszym przewymiarowaniem niż w chwili obecnej.

Niniejsza praca to wynik tematu podjętego w ramach studiów doktoranckich, ale także już kilkuletniej pracy w firmie GEA Technika Ciepła będącej jednym a wiodących producentów urządzeń i aparatury procesowej, w tym wymienników ciepła, którego przykład przedstawia rysunek 1-2.

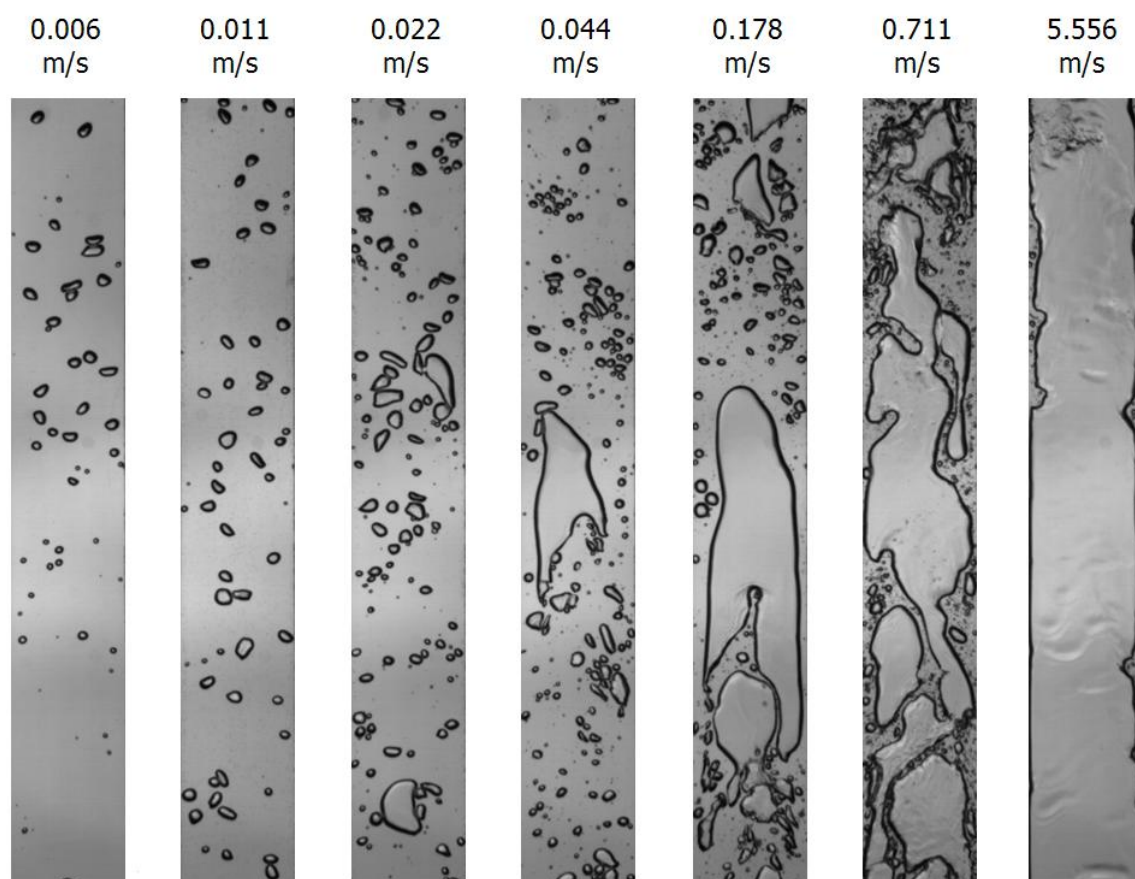


Rysunek 1-2. Przykład płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła ze stali nierdzewnej, wyprodukowanego w firmie GEA Technika Ciepła

Na potrzeby tej pracy postanowiono jednocześnie wykonać wizualizację przepływu dwufazowego wokół pęku rur z pośrednim pomiarem współczynnika wnikania ciepła na powierzchni tych rur. Podjęto badania dla różnych układów rur w pęku przy przepływie dwufazowym o różnych strumieniach przepływających faz. Badania tego typu pomogą w zrozumieniu bezpośredniego wpływu charakteru przepływu dwufazowego w układzie o złożonej geometrii jakim jest przestrzeń międzyrurowa na intensywność wymiany ciepła. Szczegółowa wiedza na temat transportu ciepła w pęku rur, oraz charakteru przepływu wokół ich powierzchni jest niezbędna do właściwego projektowania i eksploatacji wymienników ciepła.

2. Studia literaturowe w zakresie przepływu dwufazowego przez pęk rur.

Zakres występowania struktur przepływu jest jednym z najważniejszych parametrów charakteryzujących przepływ. Strukturom przepływu dwufazowego poświęcono dość dużą liczbę badań, o czym może świadczyć fakt że w literaturze cytowanych jest 78 różnych nazw zaobserwowanych i opisanych struktur przepływu w przewodzie poziomym [99]. Przykład ewolucji struktur przepływu przy wzroście udziału fazy gazowej przedstawia Rysunek 2-1.



Rysunek 2-1. Ewolucja struktur przepływu dwufazowego w kanale przy wzroście prędkości pozornej fazy gazowej, przy stałej prędkości pozornej fazy ciekłej $w_{Lo} = 0.01$ m/s wg [80]

Przepływ dwufazowy jest powszechnym zjawiskiem występującym w płaszczowo-rurowych wymiennikach ciepła. Rodzaj faz przepływających wokół pęku rur ma wpływ na rozkład współczynnika wnikania ciepła na powierzchni rur co w konsekwencji ma istotny wpływ na sprawność tych urządzeń. w celu podniesienia sprawności projektowanych i konstruowanych aparatów do wymiany ciepła, wielu badaczy przeprowadzało eksperymenty nad przepływem jednofazowym wokół pęku rur. Liczba badań nad strukturami przepływu dwufazowego wokół pęku rur jest już o wiele mniejsza.

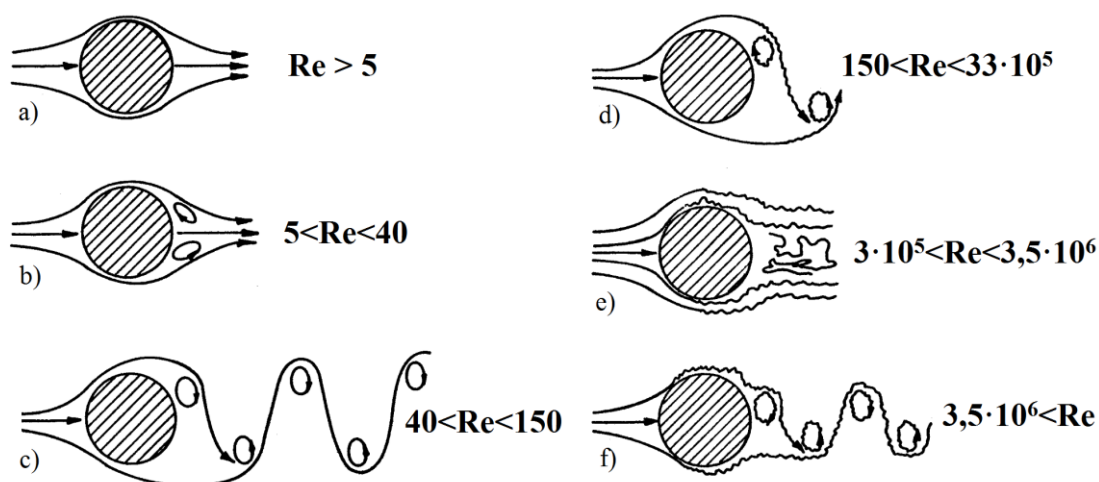
W następnych podrozdziałach postanowiono dokonać przeglądu literatury pod kątem:

- Struktur przepływu jedno i dwufazowego gaz ciecisz wokół pęku rur,
- Zastosowania metody DPIV do wizualizacji przepływu poprzecznie do pęku rur,
- Zastosowanie metody elektrochemicznej do badań przepływu ciepła w przestrzeni międzyrurowej.

2.1. Badania nad strukturami przepływu.

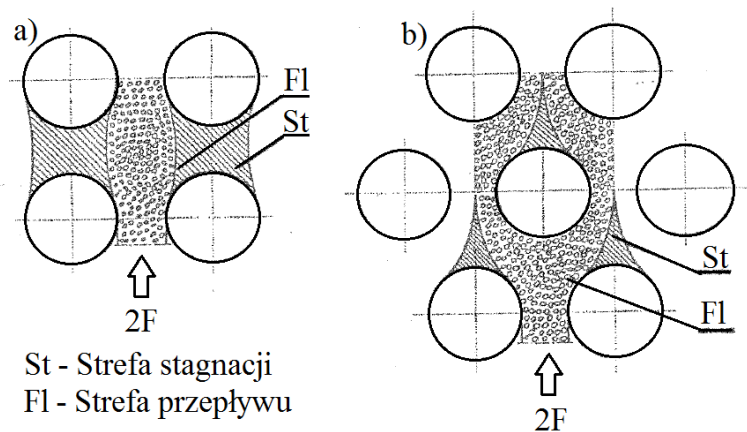
Strukturom przepływu dwufazowego po stronie płaszcza płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła poświęcono znacznie mniej badań, niż strukturom przepływu wewnątrz rur. W niewielkiej ilości badań można znaleźć opis obserwowanych struktur, oraz próby ilościowego opisu obserwowanych struktur [31], badania te opisano w niniejszym rozdziale. Należy pamiętać o tym, że struktury przepływu w skali mikro, a w szczególności rozkład prędkości, strefy stagnacji, czy struktury turbulენტne muszą być poznane w celu efektywniejszego projektowania urządzeń.

W przypadku opływu rurki przez płyn, wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa mogą się pojawić różne przypadki (Rysunek 2-2): a) przepływ laminarny bez oderwania strugi płynu od powierzchni ciała; b) przepływ z wirami w śladzie za rurą; c) przepływ z cyklicznymi wirami Karmana o ściśle określonej częstotliwości zależnej od Re ; d-f) przepływ burzliwy z chaotycznym ruchem płynu i wirów [76].



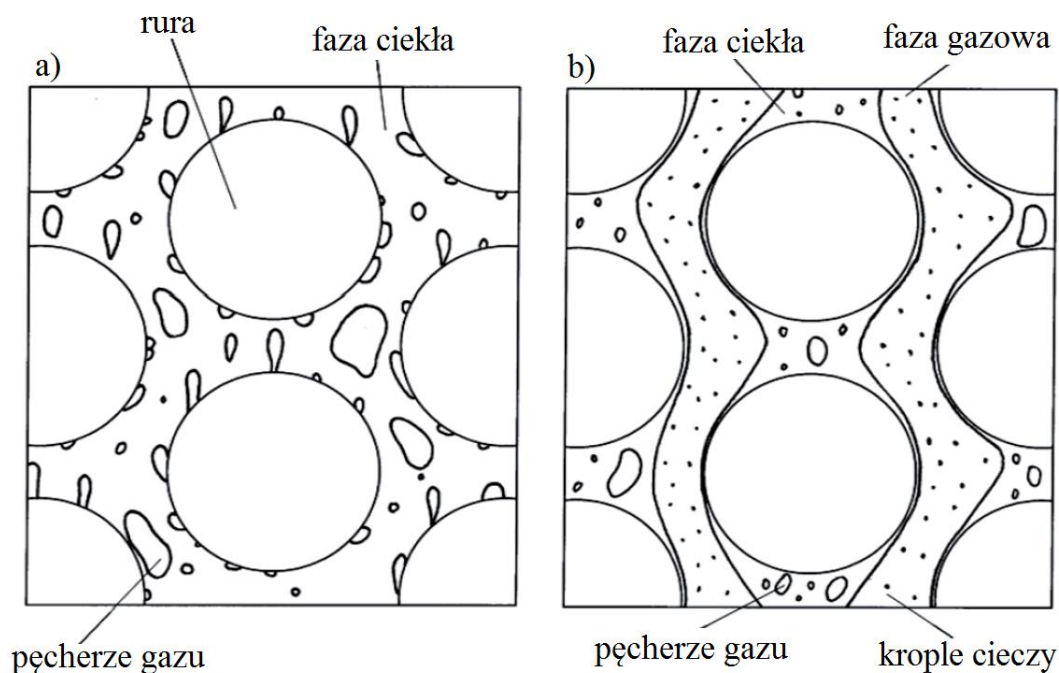
Rysunek 2-2. Opływ ciała przez płyn: a) przepływ laminarny bez oderwania strugi płynu od powierzchni ciała; b) przepływ z wirami w śladzie za rurą; c) przepływ z cyklicznymi wirami Karmana o ściśle określonej częstotliwości zależnej od Re ; d-f) przepływ burzliwy z chaotycznym ruchem płynu i wirów [76]

Przepływ płynu dwufazowego w przestrzeni międzyrurowej nie jest w swojej naturze jednorodny. z uwagi na opływanie płynu wokół rur można wyróżnić strefę przepływu strugi, gdzie koncentracja fazy gazowej jest duża, oraz strefy stagnacji, występujące zwykle za rurkami, gdzie koncentracja gazu jest znacznie mniejsza [119] (Rysunek 2-3).



Rysunek 2-3. Model rozkładu koncentracji faz w przestrzeni międzyrurowej: a) układ szeregowy, b) układ przestawny [119]

W zależności od udziałów poszczególnych faz, ich właściwości fizycznych i geometrii układu przepływ strefy te ulegają zmianie, a przepływ formuje się w konkretne struktury. Rysunek 2-4 przedstawia struktury a) pęcherzykową i b) dyspersyjną opisane przez Aprina [5].

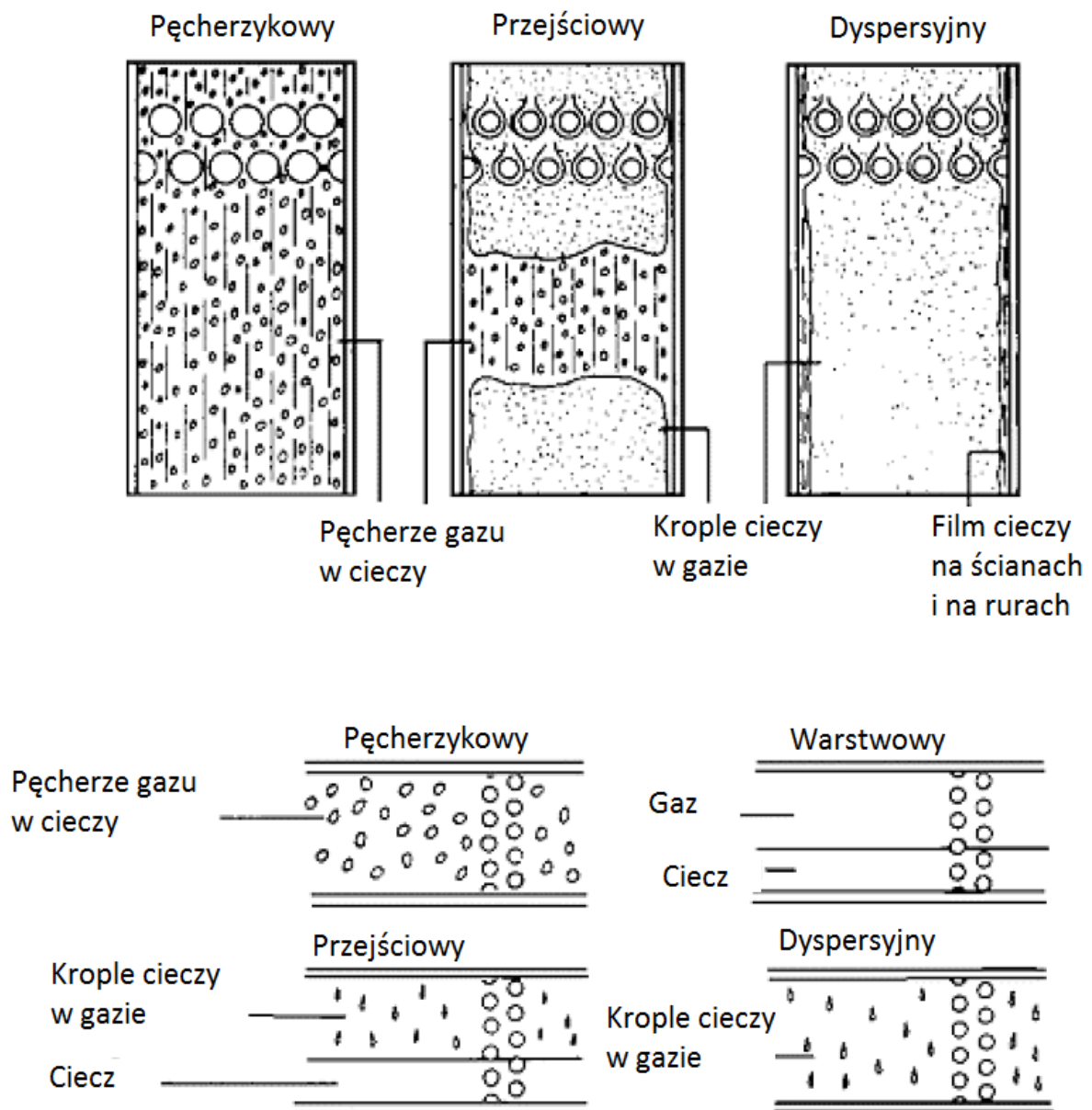


Rysunek 2-4. Struktury przepływu dwufazowego wokół pęku rur a) pęcherzykowa, b) dyspersyjna [5]

Leong i Cornwell [69] oraz Cornwell, Duffin i Schuller [26] przeprowadzili obserwacje wizualne w wycinku wytwornicy pary podczas odparowywania. Opisali dwie dominujące struktury przepływu. w dolnej części pęku rur dominującą strukturą był przepływ pęcherzykowy, w górnej części, gdzie występowały większe ilości pary wodnej, przepływem dominującym był przepływ pianowy. Dla przepływu dwufazowego wznoszącego poprzecznie do przestawnego pęku rur, Nakajima [85] zaobserwował i opisał jedynie przepływ pęcherzykowy i rzutowy. Dla przepływu opadającego Diehl [29] zaobserwował i opisał przepływy pierścieniowy i dyspersyjny. Diehl i Unruch [30] opisali przepływ dyspersyjny jako ten porywający dużą ilość kropli fazy ciekłej, a przepływ pierścieniowy, jako porywający ich niewielką ilość. Grant i Chisholm [39] przeprowadzili bardziej obszerne eksperymenty. Zbadali przepływ wznoszący i opadający, dla szerokiego zakresu zmian strumieni masowych, dla przestawnego układu rur. Zaobserwowali przepływ pęcherzykowy, rzutowy, dyspersyjny i rozwarstwiony. Kondo i Nakajima [63] prowadzili obserwacje struktur przepływu i sklasyfikowali je jako: pęcherzykowy, korkowy, pianowy i dyspersyjny. Lian i inni [75] prowadzili badania drgań pęku rur, zaobserwowali struktury pęcherzykowe i dyspersyjne struktury. Ulbrich i Mewes [116] badali przepływ dwufazowy, wznoszący jak i opadający. Powstałe w trakcie badań struktury sklasyfikowali jako pęcherzykową, przejściową i dyspersyjną, charakteryzowali również struktury będące połączeniem trzech powyższych. Xu i inni [130] [131] przeprowadzili szerokie badania przepływu wznoszącego, opadającego i poziomego. Podczas swoich badań zaobserwowali i opisali przepływające struktury jako - dla przepływu opadającego: struktury opadającego filmu, przejściową, pierścieniową i pęcherzykową, a dla przepływu wznoszącego: pulsacyjną, przejściową, pierścieniową i pęcherzykową, wreszcie dla przepływu poziomego: pierścieniową, pęcherzykową, przejściową, rozwarstwowaną. Noghrehgar i inni [89] z wykorzystaniem funkcji gęstości podobieństwa PDF określili przepływające struktury jako: pęcherzykowa, przejściowa i pierścieniowa. Zauważyli znaczne różnice pomiędzy strukturami występującymi w pobliżu ściany płaszcza, a tymi występującymi w pobliżu osi wymiennika. Burnside i inni [17] podobnie jak Iwaki i inni [51] [52] Śleziak [109], czy Karaś i inni [57] zbadali przepływ z wykorzystaniem techniki DPIV i opisali strukturę pęcherzykową. Aprin i inni [5] podobnie jak Agostini [2] przeprowadzili serię eksperymentów przy wrzeniu wokół pęku rur podczas których zaobserwowali i opisali struktury pęcherzykowe, przejściowe i dyspersyjne struktury. Huang i inni [50] próbowali opracować nową metodę identyfikacji struktur poprzez pomiar ciśnienia. Pomimo nieudanej aplikacji metody, opisali powstałe struktury jako pęcherzykową, pianową i rzutową. Van Rooyen [120] podczas obserwacji

wrzenia wokół pęku rur scharakteryzował powstałe struktury jako pęcherzykowa, przejściowa i dyspersyjna.

Najczęściej przytaczaną w literaturze jest klasyfikacja struktur przepływu zaproponowana przez Granta i Murraya [40][41], klasyfikację tą przedstawia rysunek 2-5. Przedstawiona klasyfikacja struktur została zaproponowana na podstawie badań przeprowadzonych na przestawnym układzie rur, dla jednej średnicy zewnętrznej rury i dla jednej podziałki rozstawu rur, obiektem badań był idealny model wymiennika ciepła w kształcie prostopadłościanu z przegrodami poprzecznymi.



Rysunek 2-5. Struktury przepływu pionowego i poziomego mieszaniny gaz-ciecz w poprzek pęku rur wg. Granta i Murraya [40] [41]

W pracach Ulbricha [118] [119] można znaleźć jak dotąd najszersze i usystematyzowane badania struktur w przestrzeni międzyrurowej. Autor zbadał różne konfiguracje przepływów dwufazowych; przepływ poziomy i pionowy przez poziomy pęk rur, oraz przepływ poziomy przez pionowy pęk rur. Zmieniano zarówno sposób ustawienie rur, jak i podziałkę pomiędzy rurami. Autor dla przepływu pionowego przez poziomy pęk rur zaobserwował i sklasyfikował cztery struktury przepływu:

- pęcherzykowa (B),
- przejściowa (I),
- dyspersyjna (D),
- przepływ przejściowo-dyspersyjny (ID),
- przepływ pierścieniowo-dyspersyjny (AD).

Dla przepływu poziomego przez poziomy pęk rur, autor sklasyfikował osiem struktur przepływu, a w przepływie poziomym przez pionowy pęk rur dziewięć. Są one odpowiednikami struktur występujących w rurze:

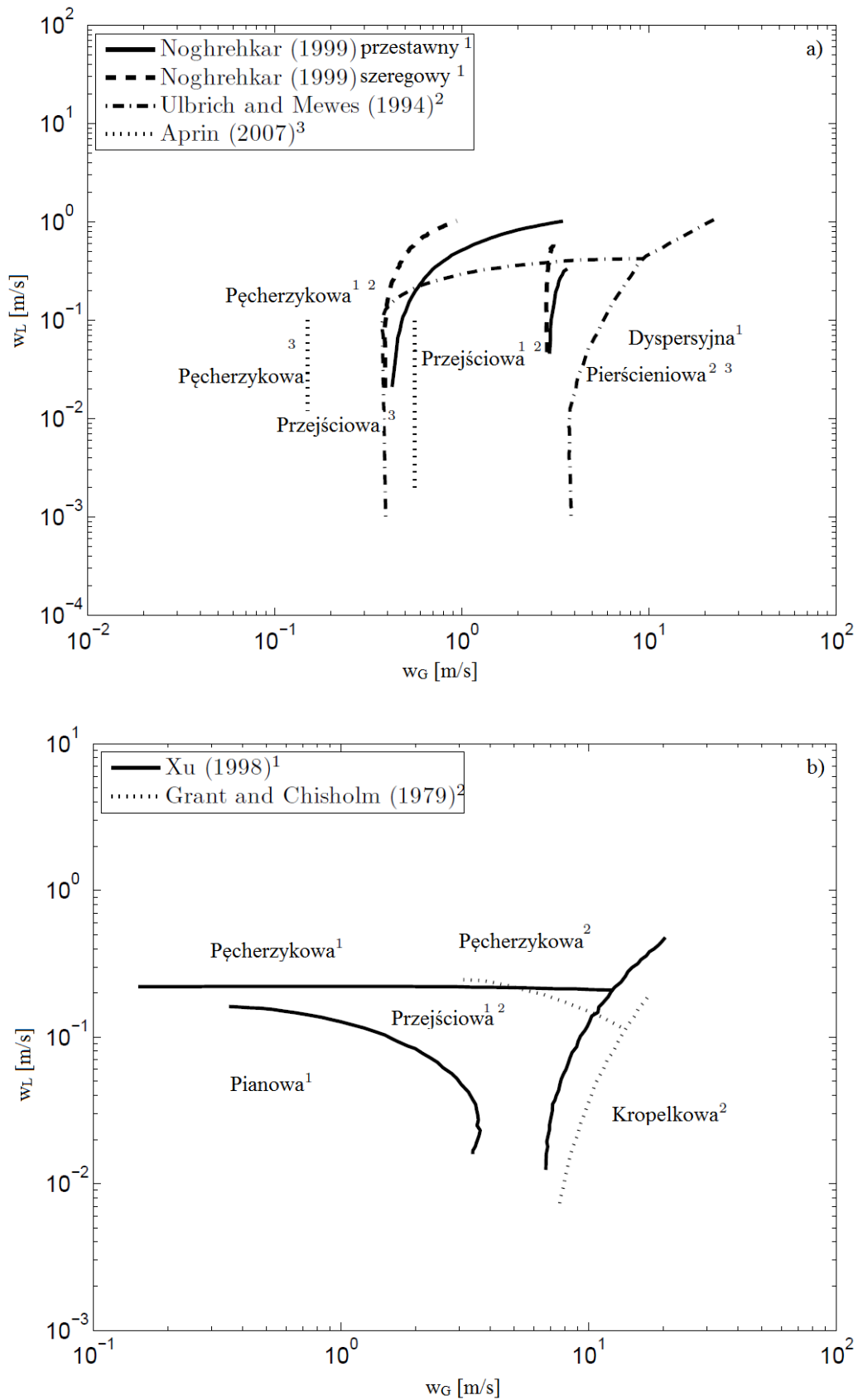
- pęcherzykowa (B),
- wydłużonych pęcherzy (EB),
- rozwarstwiona (S),
- falowa (W).

lub stanowią kombinację struktur podstawowych:

- falowo-pęcherzykowa (WB),
- falowo-dyspersyjna (WD),
- pęcherzykowo-rzutowa (FB),
- oscylacyjno-falowa (OW).

Struktury przepływu wewnątrz płaszcza wymiennika ciepła mają wpływ zarówno na opory przepływu, jak i wymianę ciepła. Zależą głównie od pozornych prędkości obydwu faz [92] ich właściwości fizycznych i geometrii aparatu. Zakres występowania poszczególnych struktur można przedstawić na mapach przepływu. Rysunek 2-6 przedstawia zestawienie najważniejszych map przepływu dwufazowego wokół pęku rur.

Rodzaj przepływających struktur musi też wpływać na wymianę ciepła w procesie wrzenia wokół pęku rur, oraz współczynnik wnikania ciepła w procesie kondensacji, jednak do tej pory żadne badania nie opisały szczegółowo tego związku. Wiedza pozwalająca przewidzieć rodzaj tworzącej się struktury przepływu, warunki przejścia jednej struktury w drugą pozwoli to ustalenie charakterystyk pracy urządzeń i uniknięcie potencjalnych problemów eksploatacyjnych. Tabela 2-1 przedstawia zestawienie omówionych prac nad strukturami przepływu.



Rysunek 2-6. Mapy przepływu dwufazowego wokół pęku rur (a) Noghrehkar i inni [89] , Ulbrich i Mewes [117] , Aprin [5] z wykorzystaniem wskaźników struktur, (b) Xu i inni [130] , Grant i Chisholm [39] na podstawie obserwacji [120]

Tabela 2-1 Przegląd badań nad strukturami przepływu dwufazowego wokół pęku rur

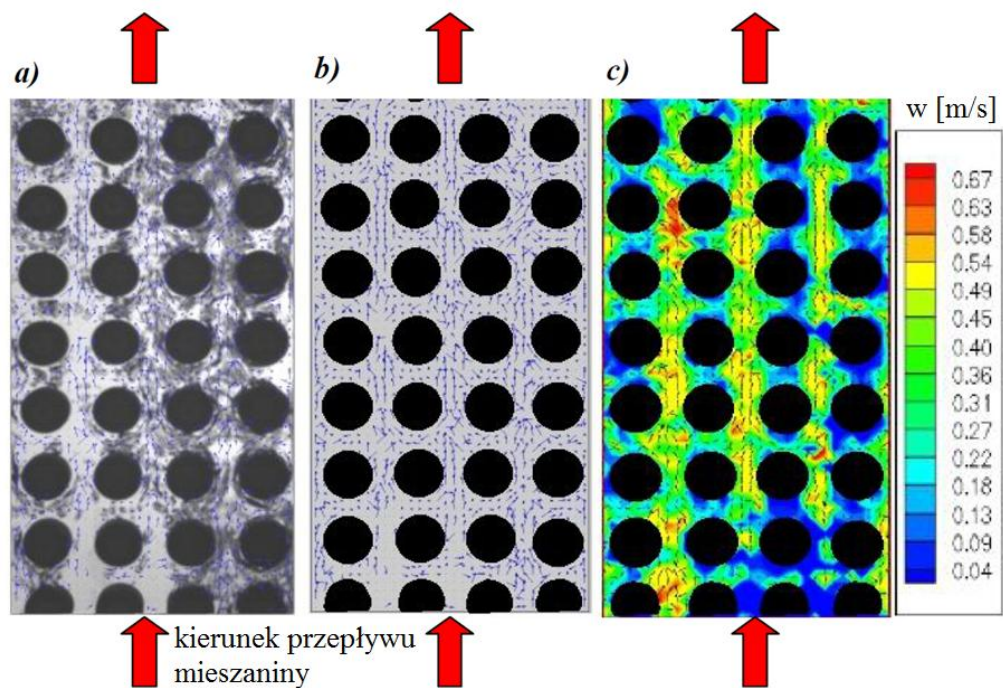
	Autor	Rok	Kierunek	Układ	d mm	t/d	Mieszanina	struktury
01	Sutherland i Murray [111]	1969	VU	-	19	-	woda - powietrze	B, I
02	Grant i Murray [40] [41]	1972, 1974	VU, VD, H	S	19	1,25	woda – powietrze	B, I, D, S
03	Grant i Chisholm [39]	1979	VU, VD, H	S	19,1	1,25	woda - powietrze	B, I, D, S
04	Kondo i Nakajima [63]	1980	VU	S	25	1,08 1,28 1,4	woda – powietrze	B, P, F, D
05	Hara [46]	1988	VU	-	30	-	woda – powietrze	B
06	Hara [47]	1988	VU	-	25	1,33	woda – powietrze	B
07	Pierotti i Bussy [96]	1988	VU	S	25	1,44	woda – para R13B1	B
08	Hara i Ijima [44]	1988	VU	L	25	1,44	woda – para R13B1	B
09	Hara [45]	1988	VU	-	25	1,33	woda – powietrze	B
10	Pettigrew i inni [95]	1988	VU	S, L	25, 13	3,0 1,32 1,47	woda – powietrze	B, I
11	Schrage, Hsu i Jengen [102]	1988	VU	L	7,9	1,30	woda – powietrze	B, I, D
12	Jatzlau [53]	1990	VU	L	22	1,50	R12 – para R12	B

Ciąg dalszy tabeli 2-1

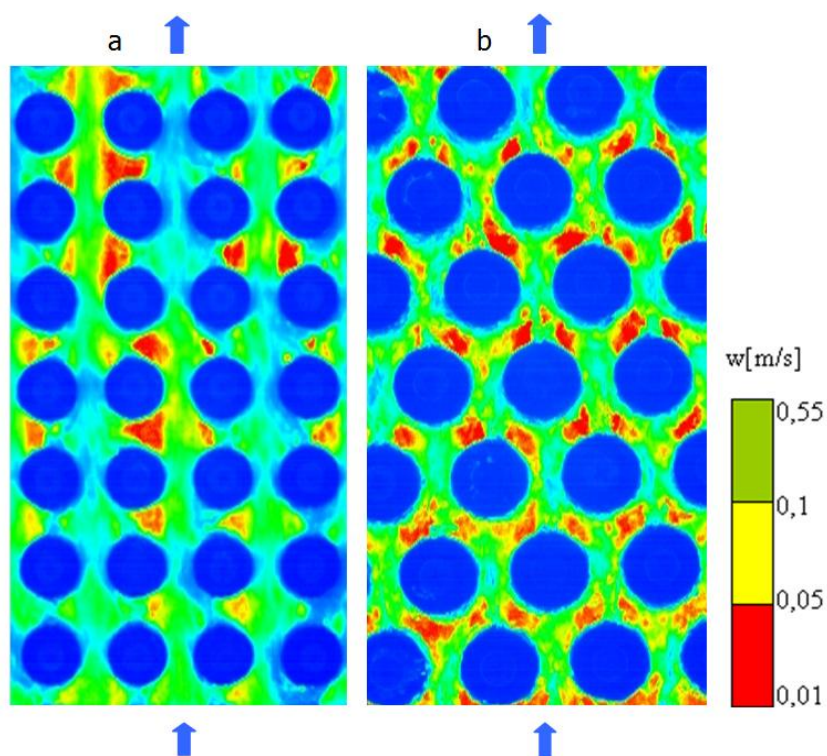
13	Lian i inni [75]	1992	VU	L	25,4	1,75	woda - powietrze	B, D
14	Ulbrich i Mewes [117]	1994	VU	L	20	1,50	woda - powietrze	B, I
15	Xu i inni [130] [131]	1998	VU, VD, H	L	9,79	1,28	woda - powietrze, olej - powietrze	I, A, B, C, S
16	Noghrehkar i inni [89]	1999	VU	L, S	12,7	1,47	woda - powietrze	B, I, A
17	Iwaki i inni [51] [52]	2004, 2005	VU	L, S	20	1,5	woda - powietrze	B
18	Śleziak [109]	2005	S	L, S	20	1,2 1,5	woda - powietrze	B
19	Aprin i inni [5]	2007	VU	S	19,05	1,33	Pentan, propan, butan	B, I, D
20	Agostini [2]	2008	VU	S	18,87	22,2	R134a, R236fa - wrzenie	B, I, D
21	Huang i inni [50]	2008	VU	S	20	1,35	R134a wrzenie	B, F, A
22	Karaś i inni [57]	2010	VU	S	15	1,66	woda - powietrze	B
23	Van Rooyen [120]	2011	H	S	18,95 19,05	22,2	R134a, R236fa - wrzenie	B, A, I
Kierunek przepływu:		V-pionowy, H-poziomy, U-wznoszący, D – opadający						
układ rur:		L-szeregowy, S-przestawny						
struktury:		B-pęcherzykowa, I-przejściowa, D-dyspresyjna, S-rozwarstwiona, P-korkowa, F-pianowa, A-pierścieniowa, C-pulsacyjna						

2.2. Wykorzystanie techniki DPIV

Pośród wielu technik służących do badań i wizualizacji przepływów, cyfrowa anemometria obrazowa DPIV jest najbardziej odpowiednią metodą nieinwazyjną do badań przepływu wokół pęku rur. Metoda ta stosowana była z powodzeniem w badaniach układów o złożonej geometrii, do których z pewnością należy układ pęku rur. Chen i Guo [18] przeprowadzili badania nad przepływem przez przestawny układ rur układu do odzysku ciepła odpadowego. Przedstawili wizualizację przepływu oraz zmierzili rozkład prędkości w strefach stagnacji za poszczególnymi rurami. Obserwowali wiry Karmana oraz ich powstawanie, parowanie się i dzielenie. Pomimo udanej aplikacji metody PIV ważny parametr częstotliwości powstawania opisanych wirów nie został wyznaczony w związku z pewnymi ograniczeniami metody badawczej. Iwaki i inni [51] zbadali struktury przepływu poprzecznego wokół pęku rur metodą PIV dla dwóch układów rur: równoległego i przestawnego. Otrzymali pola prędkości dla całego obszaru przepływu. Funkcje przepływu zostały scharakteryzowane dla tych układów za pomocą wektorowych pól prędkości, struktur wirowych oraz intensywności turbulencji. Burnside i inni [17] zastosowali metodę PIV w celu wyznaczenia pól prędkości w eksperymentalnym podgrzewaczu wody. Jedyne trudności z wyznaczeniem pól prędkości zaobserwowano w obszarach znajdujących się przy ścianach rur, oraz w miejscach gdzie dzieliły się wiry. Badania pokazały przydatność zastosowania użytej techniki w procesie projektowania podgrzewaczy i wymienników płaszczowo-rurowych. Iwaki i inni [52] zbadali struktury przepływu dwufazowego wokół przestawnego i równoległego pęku rur. Zastosowali metodę PIV uzyskując szczegółowe dane dotyczące obydwu faz: gazowej i ciekłej. Rozdzielili obrazy przepływu cieczy i pęcherzy powietrza poprzez zastosowanie filtrów optycznych i obróbki cyfrowej obrazów. To pozwoliło na wyznaczenie prędkości faz. Śleziak [109] badał przepływ przez przestawne i szeregowe układy rur. Długość rur w badanym modelu wynosiła 20mm, więc układ można traktować jako dwuwymiarowy pęk rur. Opisał występowanie nierównomierności przepływu przy opływie rury oraz ewolucje struktury w strefie stabilizacji tzn. na pierwszych rzędach rur. Zaproponował modyfikację modelu poślizgowego do obliczania udziału objętościowego gazu obejmującego udział stref stagnacji oraz nierównomierność przepływu w strefie stabilizacji. Przykład wyników przedstawia rysunek 2-7. Autor badał również związek pomiędzy stabilizacją przepływu dwufazowego, a stabilizacją stref stagnacji. Związek ten wykorzystał do oceny stabilizacji przepływu dwufazowego w zależności od parametrów geometrycznych jak i od prędkości przepływu. Przykład analizy stref stagnacji przedstawia rysunek 2-8.

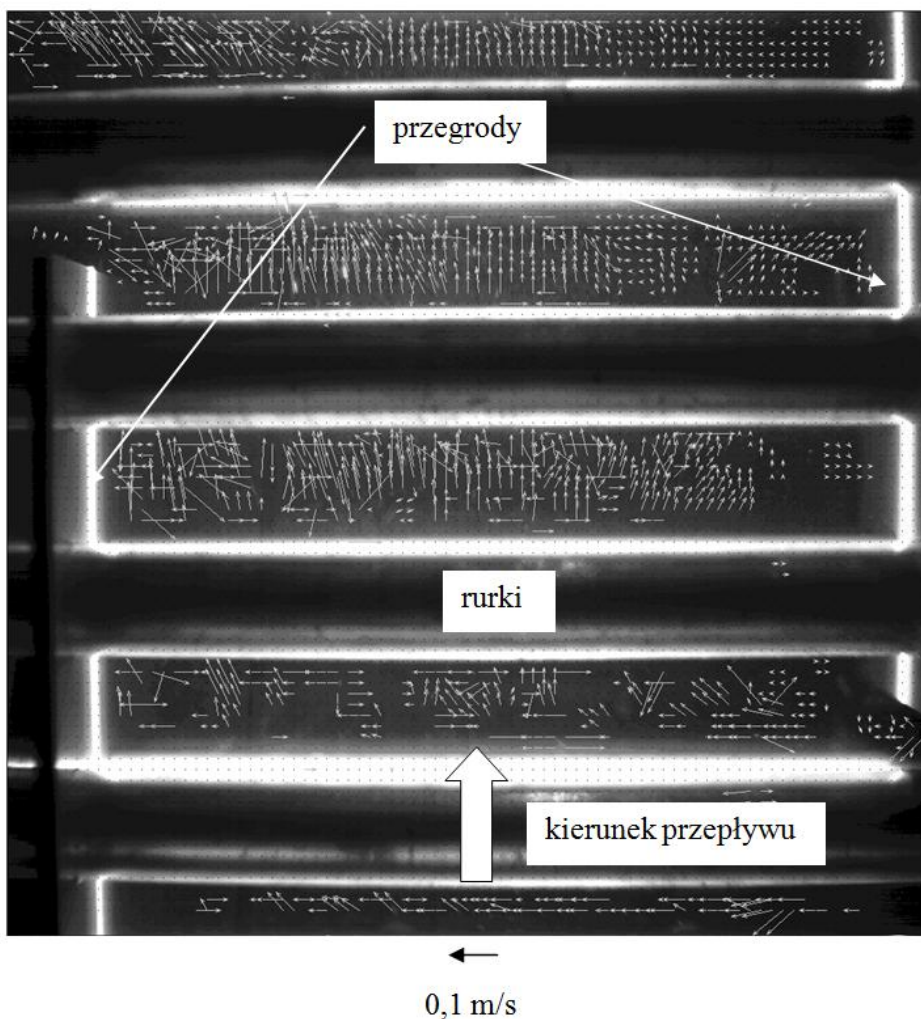


Rysunek 2-7. Przepływ dwufazowy przez szeregowy pęk rur. a) obraz przepływu, b) wektory prędkości, c) pola prędkości mieszaniny [109]

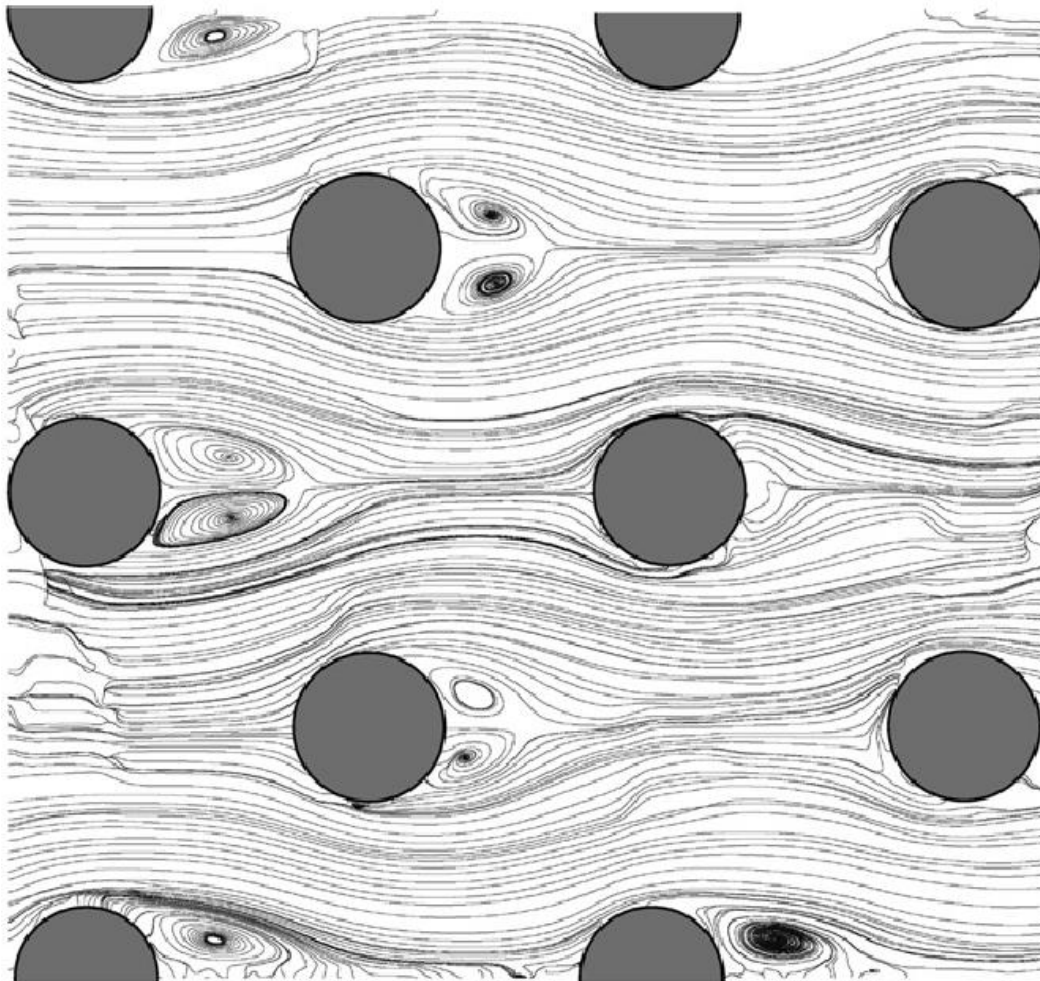


Rysunek 2-8. Przykład analizy stref stagnacji przy przepływie wokół a) szeregowego i b) przestawnego pęku rur [109]

Zając [134] badaniom metodą DPIV poddał modelowy wymiennik ciepła z szeregowym układem rur zaopatrzonym w trzy przegrody. Analizował zmianę wielkości stref stagnacji przy zmianie prędkości przepływu, wyznaczył wektory prędkości przepływu cieczy wzdłuż rur pomiędzy przegrodami. Opisał również algorytm obliczeniowy opflow który zastosowano podczas obliczeń. Przykład wyników przedstawia rysunek 2-9. Paul i inni [94] przeprowadzili badania turbulentnego przepływu poprzecznego przez przestawny pęk rur. Przy pomocy PIV scharakteryzowali zachowanie się wirów za rurami, oraz poziomy turbulencji. Przykład wyników badań przedstawia rysunek 2-10. Velasco i inni [122] zasymulowali wyciek gazu przez szczelinę w rurze i zbadali go przy pomocy PIV. Obserwowali rozwój promieniowy strumienia gazu z poprzecznego pęknięcia rury w płaszczowo-rurowym wymienniku ciepła. Autorzy w ten sposób otrzymali pola prędkości obrazujące zachowanie się przepływu przy potencjalnym skażeniu radioaktywnym w elektrowni jądrowej.



Rysunek 2-9. Wektorowe pole prędkości dla strumienia wody $3\text{m}^3/\text{h}$ [134]



Rysunek 2-10. Przykład ewolucji linii prądu dla pierwszych rzędów pęku rur da $Re=9300$ [94]

Sahin i inni [99] użyli metody PIV do scharakteryzowania struktur przepływu przez prostokątny kanał zawierający pojedynczy cylinder. Wyznaczone zostały pola prędkości, linie strumieni, oraz kontury powstałych wirów. Guziłowska [43] badała przepływ dwufazowy poprzez wycinek pęku rur z przegrodami. Stwierdziła że wielkość strzałki wycięcia i odległość między przegrodami mają znaczący wpływ na charakter przepływu dwufazowego, w tym na strefy stagnacji i recyrkulacji. Olinto i inni [91] Scharakteryzowali zaburzenia przepływu w pierwszych rzędach pęku rur z zastosowaniem PIV. Wyniki pokazały że największe zaburzenia przepływu powstawały za drugim rzędem rur. Dominguez-Ontiveros i inni [33] przeprowadzili badania wewnątrz pęku rur. Wyznaczyli pola prędkości, oraz statystyki turbulencji. Eksperymentalne wyniki porównali z obliczeniowymi danymi otrzymanymi wcześniej metodami CFD. Wyniki pokazały ogromną niestabilność przepływu oraz przepływ turbulentny wokół rur. Tabela 2-2 pokazuje zestawienie omówionych wyżej eksperymentów wykorzystujących metodę DPIV.

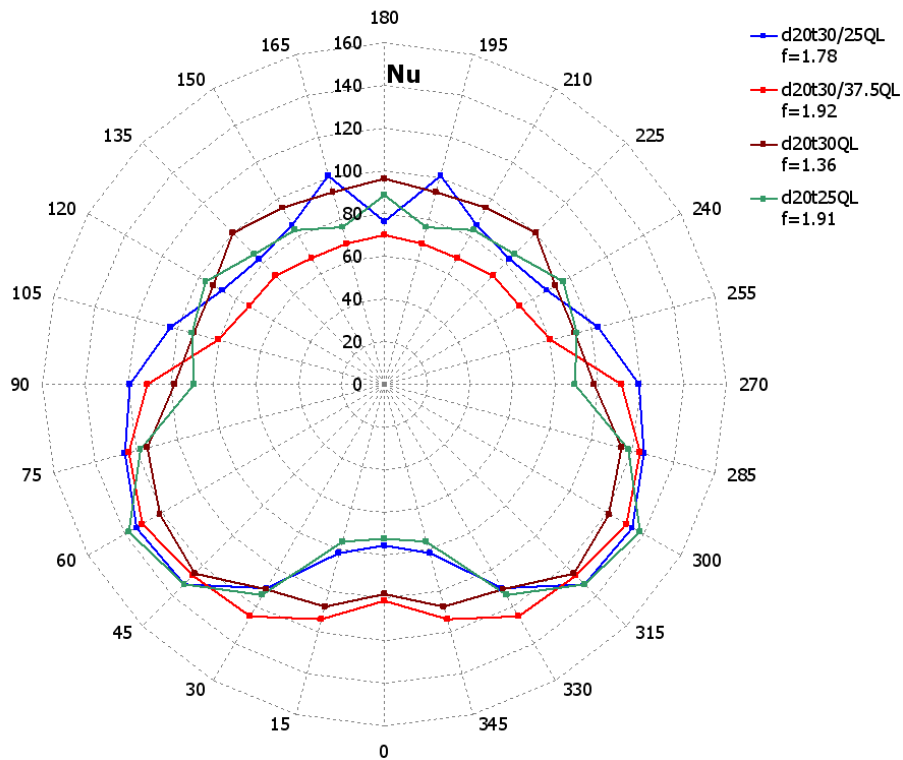
Tabela 2-2 Zestawienie badań przepływu wokół pęku rur z wykorzystaniem metody PIV

Lp.	Autor	Rok	Układ rur	Średnica rur [mm]	Podziałka	Liczba rzędów	Liczba Reynoldsa
01	Chen i Guo [18]	2000	przestawny	20	2	4	3 500 - 14 400
02	Iwaki i inni [51]	2004	szeregowy, przestawny	15	1,5	20	5 400 - 29 700
03	Burnside i inni. [17]	2004	szeregowy	19	1,33	17	52 000
04	Iwaki i inni [52]	2005	szeregowy, przestawny	15	1,5	20	470 - 3 800 120 - 1 500
05	Śleziak [109]	2005	szeregowy, przestawny	20	1,2-1,8	9	4500 - 9000
06	Zajac [134]	2006	szeregowy	20	2	6	-
07	Paul i inni [94]	2007	przestawny	25,4	2,1 2,8	6	4 800, 9 300, 14 400
08	Velasco i inni [122]	2007	szeregowy	19,05	0,4	12	80 000 - 270 000
09	Sahin i inni [99]	2008	-	50	-	-	1 500 - 6 150
10	Guziałowska [43]	2008	-	20	1,45	-	-
11	Olinto i inni [91]	2009	szeregowy	75	1,26	5	30 000 - 40 000
12	Dominguez i Hassan [33]	2009	przestawny	10,25	1,26	5	48 000
13	Zhang i inni [135]	2010	przestawny	15	2,0 2,5 3,3	7	2250

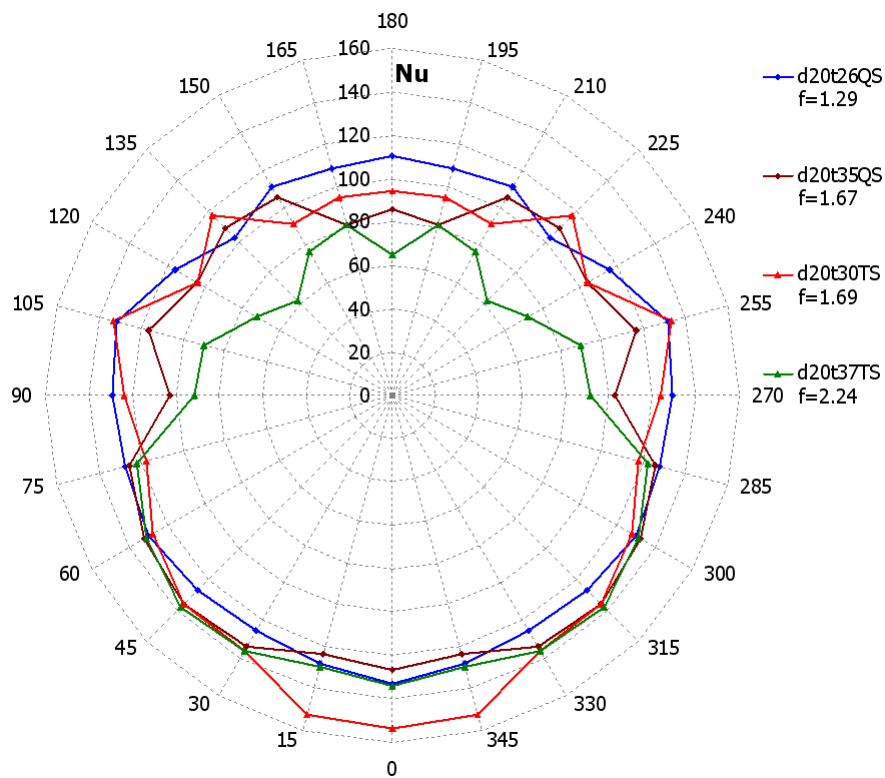
2.3. Wykorzystanie metody elektrochemicznej

Wykorzystanie metody elektrochemicznej, dzięki analogii transportu masy i ciepła, do wyznaczenia intensywności wymiany ciepła jest znane już od lat 50, niewiele jest prac opisujących jej wykorzystanie do bezpośredniego badania wymienników ciepła. Lin [77] badał proces wymiany masy w kolumnie pęcherzykowej, Mackbeth [81] badał proces wymiany ciepła w modelu wymiennika ciepła, Mickley [82] przebadał lokalne wartości współczynników wnikania ciepła w wymienniku płaszczowo-rurowym. Nieva i Böhm [86] [87] [88] badali transport masy na powierzchni pojedynczych cylindrów, jak również cylindrów umieszczonych w układach równoległych i przestawnych pęków rur. Bieniasz [8] [10] [11] [12] [13] zajmował się wykorzystaniem metody elektrochemicznej do badań nad transportem masy w układach o różnej geometrii takich jak kanały z cylindrycznymi segmentami, czy płytkowe wirniki regeneratora obrotowego. w pracach swoich dokonał zestawienia danych literaturowych, szczegółowo opisał procesy elektrochemiczne oraz sposoby ich wykorzystania w badaniach eksperymentalnych. Poza pracami Bieniasza, szczegółowy opis metody można znaleźć w pracach Mizushimy [83] i Shutza [106] Wilk [124] [125] [127] [126] z powodzeniem stosowała metodę elektrochemiczną w badaniach transportu masy i ciepła w mini kanałach.

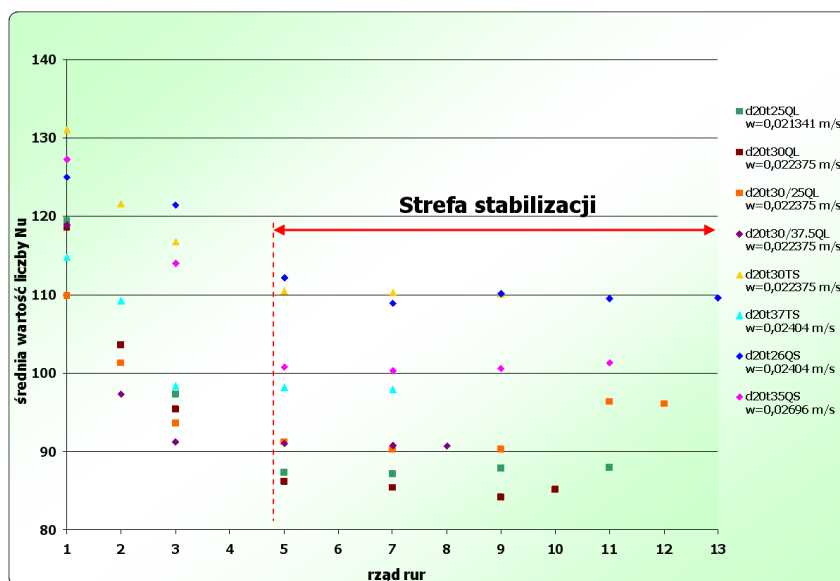
Siejka [107] wykorzystowała metodę elektrochemiczną do badania współczynnika wnikania ciepła na powierzchni rur. w badaniach tych elektrolit nie posiadał wewnętrznego obiegu, a jego ruch przez przestrzeń kanału wywoływany był unoszeniem się pęcherzy azotu. w tym przypadku nie mamy zatem do czynienia z współprądowym przepływem gazu i cieczy, jakkolwiek w pękach rur zanurzonych w aparatach z takim przepływem możemy mieć do czynienia. Badania przeprowadzono dla wkładów rurowych o różnej geometrii. Autorka określiła nierównomierność wnikania ciepła na obwodzie rur jako stosunek maksymalnej do minimalnej liczby Nusselta określony jako funkcję ilorazu Nu_{max}/Nu_{min} , oraz porównała nierównomierności dla różnych układów rur. Przykład wyników badań przedstawia rysunek 2-11 i rysunek 2-12. Na podstawie badań określiła, że wymiana ciepła najintensywniej przebiega dla pierwszych rzędów rur. Dla kolejnych, aż do 4 ÷ 6 rzędu rur zaobserwowała spadek efektywności procesu wymiany. Po piątym rzędzie rur zaobserwowała stabilizację, a w niektórych przypadkach minimalny wzrost wartości współczynnika wnikania ciepła. Wyniki tej analizy przedstawia rysunek 2-13.



Rysunek 2-11. Porównanie lokalnych wartości liczb Nu dla rurki umieszczonej w drugim rzędzie szeregowych pęków rur, oraz wartości f

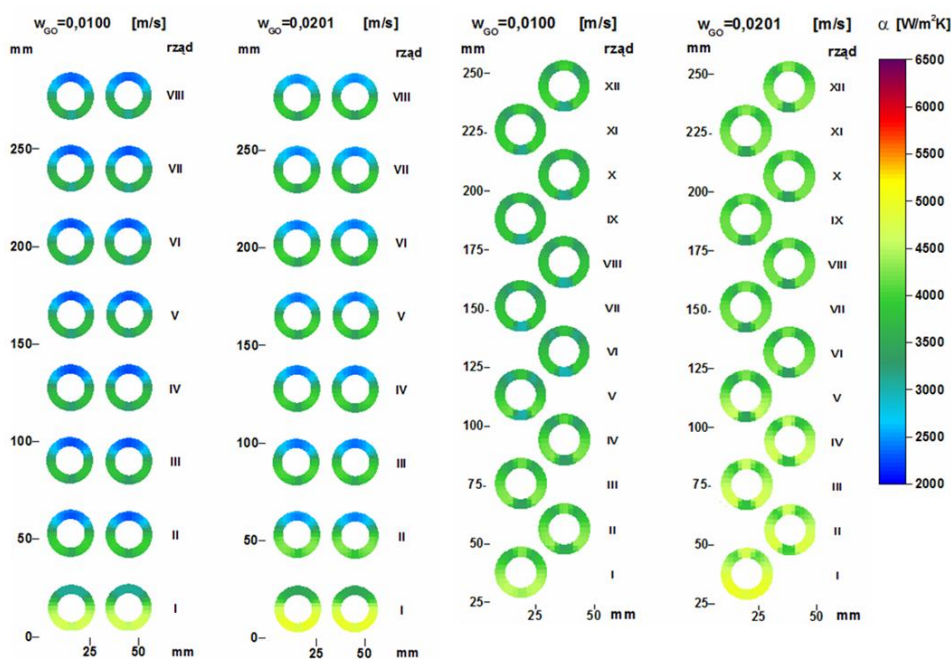


Rysunek 2-12. Porównanie lokalnych wartości liczb Nu dla rurki umieszczonej w trzecim rzędzie dla przestawnych pęków rur, oraz wartości f



Rysunek 2-13. Średnia wartość liczby Nu dla rurki w zależności od rzędu dla ośmiu badanych układów rur [107]

Autorka interpolowała wyniki badań wykorzystując analizę geostatystyczną i za ich pomocą zobrazowała nierównomierność wymiany ciepła na powierzchni rur, przykład wyników obrazuje rysunek 2-14.



Rysunek 2-14. Rozkłady współczynnika wnikania ciepła w przestrzeni międzyrurowej dla układu rur szeregowego i przestawnego dla dwóch różnych prędkości pozornych gazu [107]

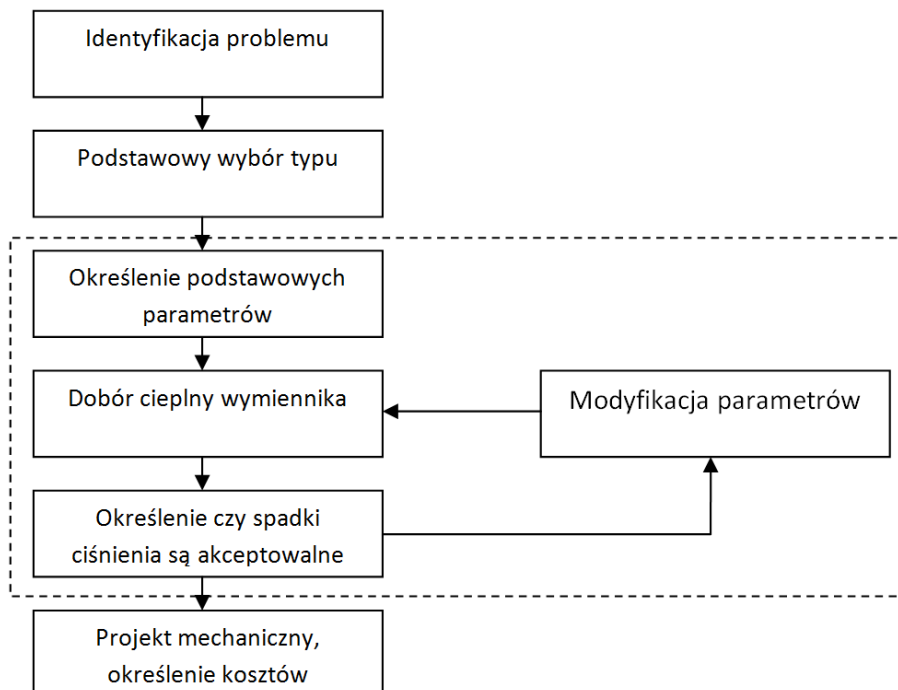
Tabela 2-3 przedstawia przegląd stosowalności metody elektrochemicznej na bazie pracy [107].

Tabela 2-3 Zarys historyczny stosowalności metody elektrochemicznej

Lp	Autor		Rok	Przedmiot badań:
01	Lin	[77]	1951, 1953	Wymiana masy w kolumnie pęcherzykowej
02	Grassmann, Ibl, Trüb	[42]	1961	Pomiary stopnia zapełnienia dla przepływu pęcherzykowego
03	Mizushina	[83]	1971	Pomiary prędkości przepływu płynu
04	Macbeth	[78]	1972	Badania modelowego wymiennika ciepła
05	Kuttateladze	[66]	1973	Pomiary naprężeń stycznych w płynie
06	Mckley	[82]	1973	Lokalne współczynniki wnikania ciepła w płaszczowo– rurowym wymienniku ciepła
07	Patil, Sharma	[93]	1983	Wymiana masy dla przepływu dwufazowego ciecz–ciało stałe w kolumnach o różnych średnicach
08	Bieniasz	[12] [11]	1997, 2005	Konwekcyjna wymiana ciepła i masy w wirnikach płytkowych regeneratora obrotowego dla gazów
09	Nieva , Böhm	[87]	1979	Współczynnik wnikania masy wokół pojedynczej rury i dwóch sąsiadujących rur
10	Bieniasz	[8]	1980	Wykorzystanie elektrolizy i analogii wymiany ciepła i masy w projektowaniu wymienników ciepła
11	Nieva, Böhm	[86]	1985	Lokalna wymiana masy wokół rury umieszczonej w przestawnym pęku rur dla pośrednich liczb Reynoldsa
12	Jayo, Nieva, Böhm	[54]	1985	Nierównomierność wymiany masy wokół rury umieszczonej w pękach rur: przestawnym i szeregowym
13	Giorgio, Cavatorta, Böhm	[35] [36]	1993, 1994	Wymiana masy w pęku rur przy przepływie dwufazowym gaz–ciecz oraz dla złoża stałego i fluidalnego
14	Stręk, Karcz	[110]	1999	Transport masy w obszarze przyściennym mieszalnika cieczy
15	Keirsbulck i inni	[61]	2002	Wpływ powierzchni chropowatej na turbulencje przepływu w warstwie przyściennej
14	Labraga i inni,	[68]	2002, 2004	Pomiar naprężeń stycznych w turbulentnej warstwie przyściennej
15	Labraga, Berkah	[67]	2004	Wymiana masy wokół rury przy przepływie poprzecznym
16	Wilk	[127]	2004	Badanie wymiany ciepła w kanałach wirnika regeneratora obrotowego
17	Siejka	[107]	2006	Badanie wymiany ciepła w pęku rur
18	Wilk	[125]	2009	Badanie wymiany ciepła w krótkich mini kanałach

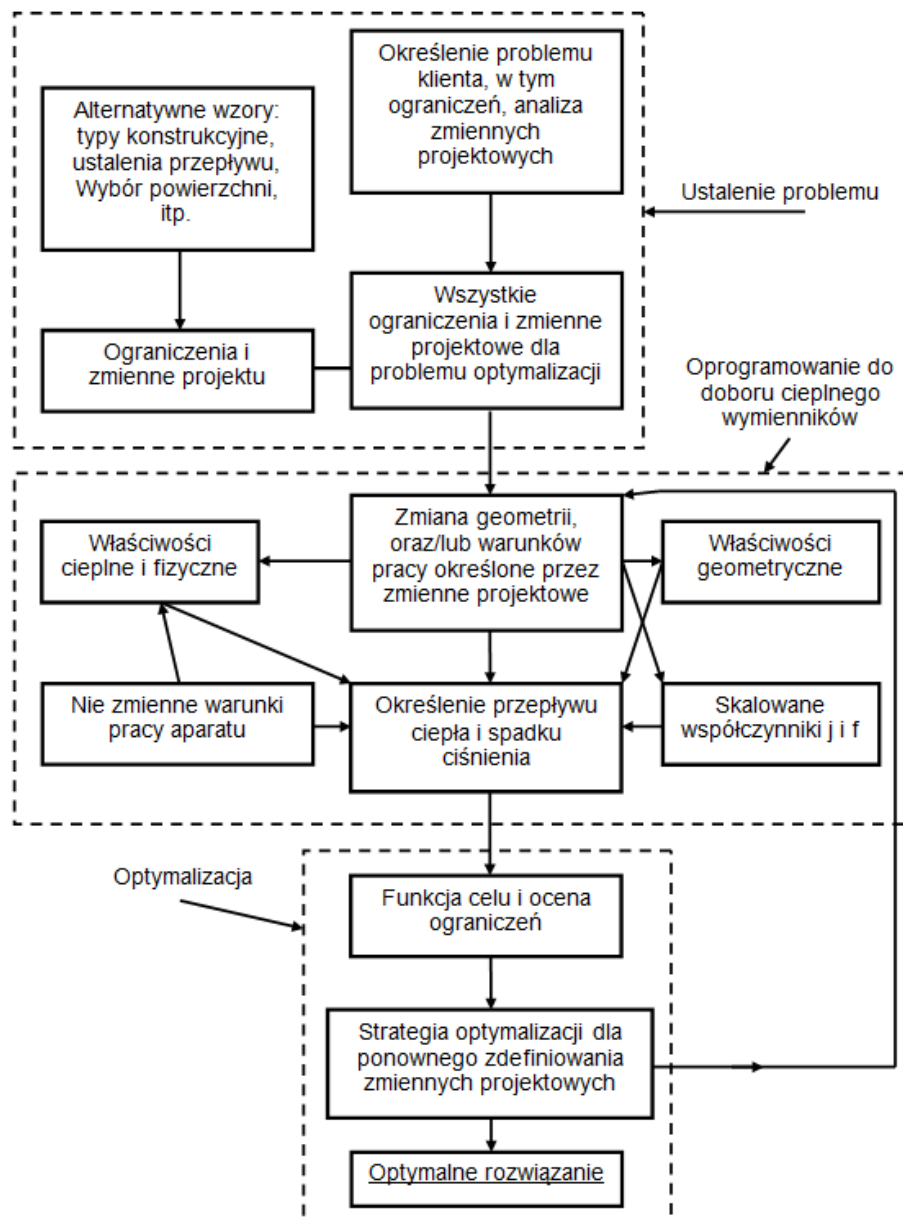
3. Projektowanie płaszczowo-rurowych wymienników ciepła.

Badania nad przepływem płynów w modelu wymiennika ciepła, czy jest to wizualizacja tego przepływu, czy wyznaczenie współczynnika wnikania ciepła są prowadzone w celu dokładniejszego poznania charakteru tego przepływu i zjawisk mu towarzyszących. Jest to jednak droga do spełnienia celu użytecznego jakim jest umożliwienie dokładniejszego zaprojektowania aparatu do wymiany ciepła. Dobór cieplny wymienników ciepła w obecnych czasach odbywa się za pomocą specjalistycznego oprogramowania komputerowego. Dobre zrozumienie podstawowych zasad fazy projektowania wymiennika ciepła jest potrzebne do odpowiedniego stosowania programów do obliczeń cieplnych i przepływowych. Inżynier który ma za zadanie dobór cieplny urządzenia powinien potrafić wyjaśnić zasady, którymi należy się kierować przy projektowaniu, znać części składowe wymiennika ciepła, klasyfikację różnych wymienników ciepła w zależności od budowy, jak i przeznaczenia. Musi też wiedzieć jakie dane są potrzebne do doboru cieplnego, jak dobrać odpowiednią geometrię, ilość przegród, rodzaj ułożenia rur w pęku, jak wyznaczyć i jaki dobrać spadek ciśnienia. Podstawowe równania do wyznaczenia wartości wymiany ciepła czy spadku ciśnienia zarówno w przestrzeni międzyrurowej, jak i w rurach można znaleźć w literaturze [120] jednak należy wiedzieć jak w pełni wykorzystać tą wiedzę do optymalnego doboru wymiennika ciepła.



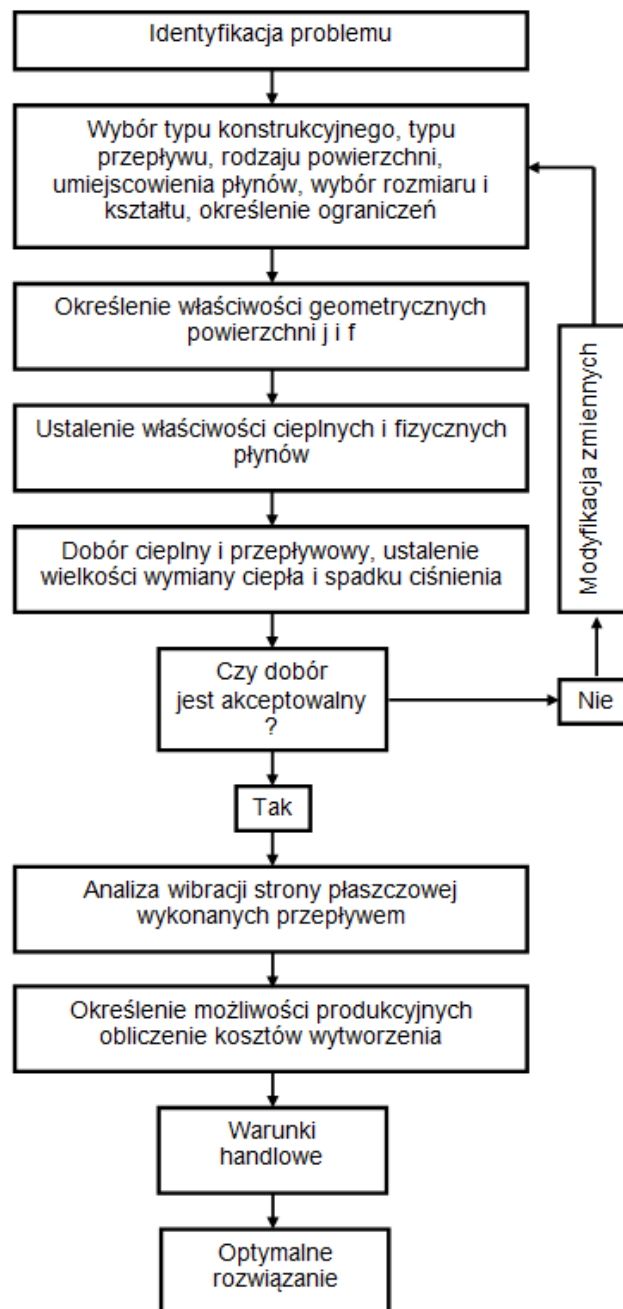
Rysunek 3-1. Proces projektowania wymienników ciepła wg [129]

W literaturze jest wiele pozycji opisujących szczegółowo proces projektowania wymienników ciepła, [115] [84] [32] [65] [48] [120] [6]. Chcąc ułatwić ogólny opis projektowania wymienników ciepła, kilku autorów przedstawiło proces, doboru cieplnego, przepływowego i optymalizacji w postaci układów blokowych. w pracy [129] przedstawiono strukturę procesu projektowania wymienników ciepła. Jest ona niezmienna niezależnie od tego czy używamy do obliczeń oprogramowania komputerowego, czy wykonujemy obliczenia ręcznie. Bardziej złożony diagram można znaleźć w pracy [104].



Rysunek 3-2. Proces projektowania wymienników ciepła wg [104]

Ten sam autor proponuje jeszcze zastosowanie innego schematu postępowania na etapie projektowania i doboru cieplnego i przepływowego wymiennika ciepła [105].



Rysunek 3-3. Proces projektowania wymienników ciepła wg [105]

Jak widać na powyższych schematach, proces projektowania wymiennika ciepła rozpoczyna się od identyfikacji problemu jaki chcemy rozwiązać. Następnym krokiem jest wybór, często na próbę pewnego typu rozwiązania konstrukcyjnego odpowiedniego dla danego procesu. Projektant musi założyć który z czynników wymieniających ciepło będzie płynął wewnątrz rur, a który w części płaszczowej. Zazwyczaj decyzja ta ma związek z minimalizacją kosztów

przetłaczania płynów. Jeżeli przykładowo, woda ma być wykorzystana do chłodzenia oleju, to gęstszy olej powinien płynąć w przestrzeni międzyrurowej [113] Należy jednak pamiętać o innych właściwościach procesu mogących wpłynąć na tą decyzję [65], które przedstawia tabela 3-1.

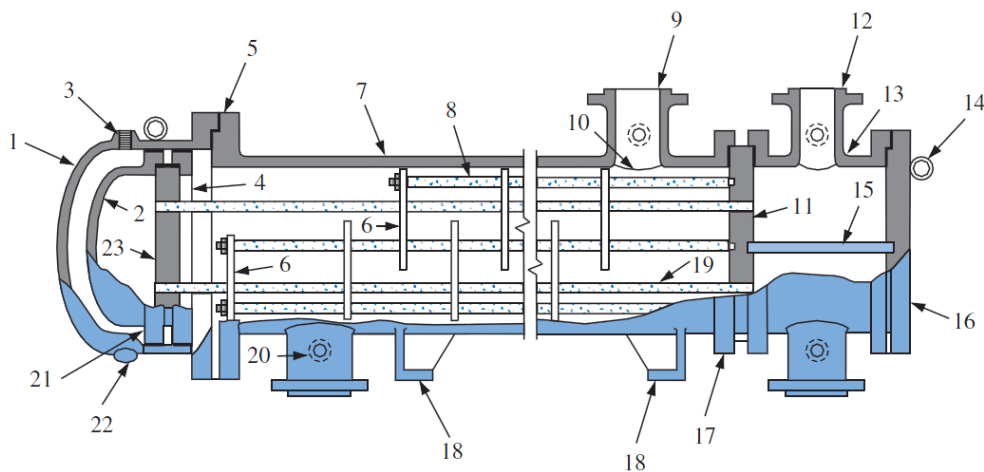
Tabela 3-1 Wytyczne do umiejscowienia płynów w aparacie płaszczowo-rurowym [65]

Problem	Opis
Korozja	Mniejsze ilości wysokostopowych, nierdzewnych i drogich materiałów należy zużyć jeżeli płyn korozyjny będzie przepływał wewnątrz rur.
Zabrudzenie	Można zmniejszyć odkładanie się zanieczyszczeń w wymienniku poprzez umiejscowienie zabrudzonego płynu wewnątrz rur, gdzie prędkości przepływu są wyższe.
Możliwość Czyszczenia	Czyszczenie strony płaszczowej jest trudniejsze, czyszczenie chemiczne jest zazwyczaj nieskuteczne przez bocznikowanie przepływu, co wymaga zastosowania czystszej płynu. Proste rury można czyścić wewnątrz mechanicznie bez wysuwania pęku, czyszczenie chemiczne wewnątrz rur jest zazwyczaj skuteczniejsze niż wokół pęku.
Temperatura	Dla procesów wysokotemperaturowych dla których należy stosować specjalne stopy droższych stali, mniej tego rodzaju materiału zużyjemy gdy gorący płyn będzie przepływał wewnątrz rur.
Ciśnienie	Umieszczenie płynu o wysokim ciśnieniu wewnątrz rur, będzie wymagało zastosowania mniejszej ilości drogich, wysokociśnieniowych materiałów, grubość płaszczka będzie mniejsza.
Opory przepływu	Jeżeli opory przepływu któregoś z płynów jest krytyczne i powinno zostać dokładnie oszacowane, wówczas płyn ten powinien zostać umieszczony wewnątrz rur.
Gęstość	Wyższe wartości współczynnika wnikania ciepła otrzymuje się zazwyczaj poprzez umiejscowienie płynu gęstego po stronie płaszczowej. Dla przepływu burzliwego po stronie płaszczowej wartość krytyczna liczby Reynoldsa wynosi 200, więc może dojść do sytuacji w której ten sam przepływ w części wewnątrz rurowej miałby charakter laminarny. Jednak jeżeli przepływ ten po stronie płaszczowej jest nadal laminarny, wtedy lepszym rozwiązaniem jest umieszczenie płynu gęstego wewnątrz rur, gdzie łatwiej jest określić przepływ ciepła i rozkład prędkości [132].
Płyny toksyczne, niebezpieczne	Płyny toksyczne, czy niebezpieczne powinny być umieszczone wewnątrz rur, dodatkowo należy zastosować konstrukcję z podwójnym sitem w celu zminimalizowania ryzyka wycieku. Należy bezwzględnie przestrzegać przepisów związanych z przepływem tego rodzaju połynów.
Wartości przepływu	Umieszczenie płynu o niższej wartości strumienia przepływu po stronie płaszczka skutkuje zazwyczaj bardziej ekonomicznym rozwiązaniem. Dodatkowo jest to bezpieczniejsze ze względu na wibracje wywoływane przepływem. Turbulencje pojawiają się po stronie płaszczowej przy niższych prędkościach przepływu porównując z przepływem wewnątrz rur.

Biorąc pod uwagę ciśnienie i temperaturę pracy czynnika należy dobrać grubości materiałów, czy typ konstrukcji komory w oparciu o obowiązujące przepisy. w początkowej fazie projektowania przydatnym może okazać się pojęcie „smukłości wymiennika” oznaczające bezwymiarowy stosunek długości wymiennika do średnicy płaszcz. Wielkość ta jest charakterystyczna dla rozmaitych rozwiązań konstrukcyjnych, szczegółowy jej opis można znaleźć w pracy [48]. Projektant powinien wiedzieć czy wymiennik będzie zanieczyszczany, czy czyszczenie będzie wymagało skomplikowanych technik, czy występują wymagania dotyczące materiałów, oraz inne nietypowe warunki występujące w procesie. Kolejnym krokiem jest przeprowadzenie obliczeń cieplnych i przepływowych których wynikiem będzie określenie wielkości powierzchni wymiany ciepła i wartości spadku ciśnienia. Otrzymane wyniki należy porównać z założeniami. Jeżeli nie spełniają oczekiwań projektanta, należy zmieniać parametry geometryczne wymiennika do uzyskania optymalnego wyniku. Projektant do dyspozycji ma rury o różnych średnicach i długości, które można zamocować w sicie o różnej podziałce rozstawu rur. Dodatkowo można zmieniać gabaryty samego płaszcz, wprowadzić przegrody w różnej ilości i geometrii. Obliczenia należy kontynuować do uzyskanie wymaganej wydajności urządzenia przy wartości spadku ciśnienia zbliżonej do maksymalnej dopuszczalnej. Celem tego działania jest otrzymanie niezbędnej powierzchni wymiany ciepła przy minimalnych gabarytach urządzenia.

Inżynier, przed którym stoi zadanie zaprojektowania wymiennika ciepła, powinien posiadać szczegółową wiedzę na temat części składowych wymiennika. Nie chodzi tu jedynie o świadomość z czego zbudowany jest wymiennik, lecz jaki wpływ mają te części na przepływ mediów a co za tym idzie na wymianę ciepła i spadek ciśnienia. Podstawowe części składowe wymiennika płaszczowo-rurowego to płaszcz, osłona płaszcz, rury, kanał, osłona kanału, dno sitowe, przegrody i króćce. w rzeczywistości budowa wymiennika płaszczowo-rurowego wymaga o wiele więcej części składowych, co przedstawiono na przykładzie wymiennika z ruchomą głowicą, którego schemat przedstawia rysunek 3-4.

Największą i najbardziej szczegółową klasyfikację płaszczowo-rurowych wymienników ciepła wykonało stowarzyszenie największych producentów tych urządzeń, Tubular Exchangers Manufacturers Association (TEMA) [114] Przedstawiona przez nich klasyfikacja, oraz zaproponowane standardy zyskały światową akceptację jako autorytetu w zakresie mechanicznego doboru wymienników.



- | | |
|--------------------------------|-------------------------------|
| 1. Osłona płaszcz | 13. Komora |
| 2. Ruchoma głowica | 14. Ucho transportowe |
| 3. Odpowietrzenie | 15. Podział komory |
| 4. Ruchoma głowica | 16. Osłona komory |
| 5. Kołnierz komory | 17. Kołnierz komory |
| 6. Przegrody | 18. Podpory |
| 7. Płaszcz | 19. Rury wymiennikowe |
| 8. Ściągacze i dystanse | 20. Mufa testowa |
| 9. Króciec – strona płaszczowa | 21. Kołnierz ruchomej głowicy |
| 10. Przegroda uderzeniowa | 22. Spust cieczy |
| 11. Nieruchome dno sitowe | 23. Ruchome dno sitowe |
| 12. Króciec – strona rurowa | |

Rysunek 3-4. Przykład budowy wymiennika płaszczowo-rurowego z ruchomą głowicą [64]

3.1. Dane obliczeniowe.

Bez konkretnych danych procesowych nie uda się odpowiednio dobrać wymiennika ciepła. Pewne wartości można wyliczyć, lecz istnieją pewne dane bez których projektant nie będzie w stanie dobrać odpowiedniego urządzenia, do których należą:

1. Strumienie objętościowe lub masowe obydwu mediów biorących udział w procesie.
2. Temperatury wlotowa i wylotowa. w przypadku strumieni i temperatur nie musimy dysponować dosłownie wszystkimi danymi. Na przykład mając dany strumień i dane temperatury po jednej stronie, jesteśmy w stanie obliczyć z bilansu cieplnego temperaturę po drugiej stronie dysponując tylko temperaturą wejściową i strumieniem. Na podstawie różnicy temperatur projektant może dobrać odpowiedni rodzaj wymiennika ciepła
3. Ciśnienie pracy. Wartość ta ma szczególne znaczenie w przypadku gazów, w związku z ich ściśliwością. w przypadku płynów dla samego doboru cieplnego informacja ta

nie ma większego znaczenia, wpływa jednak na obliczenia konstrukcyjne, w tym na grubość elementów w zależności od zastosowanych materiałów ciśnieniowych wykorzystanych do budowy urządzenia.

4. Dopuszczalny spadek ciśnienia. Jest to jeden z ważniejszych parametrów charakteryzujących pracę urządzenia. Generalnie dla płynów spadek ciśnienia waha się w granicach 50 – 70 kPa. Wyższe spadki ciśnienia mogą wystąpić w szczególnych przypadkach, na przykład dla płynów lepkich. Dla gazów można spotkać wartości od 5 do 20 kPa, jako standard można przyjąć 10 kPa [114]. Dążąc do znalezienia kompromisu pomiędzy rozwinięciem jak największej powierzchni wymiany ciepła w najmniejszej objętości aparatu, a nie przekroczeniem maksymalnych dopuszczonych spadków ciśnienia, projektant musi wybrać odpowiedni rodzaj rur, ich długość, oraz ich rozmieszczenie w pęku. Oczywistym czynnikiem wpływającym na rodzaj wybranych rur i den sitowych jest ich koszt i dostępność.
5. Właściwości fizykochemiczne płynów biorących udział w wymianie ciepła. Najważniejsze dane dotyczą gęstości, lepkości, przewodności cieplnej i ciepła właściwego. Dzięki tym informacjom projektant może dobrać odpowiedni rodzaj materiałów z których zbudowany zostanie wymiennik ciepła, oraz określić jego geometrię. w większości przypadków oprogramowania służącego do obliczeń wymienników ciepła projektant ma do dyspozycji bazę danych najczęściej wykorzystywanych płynów.
6. Klient może również zadać wartość mocy urządzenia, jeżeli tego nie zrobi, można ją wyliczyć z podanych strumieni i temperatur czynników.
7. Stopień i rodzaj zanieczyszczenia przepływających czynników. Informacja ta jest niezbędna do doboru odpowiedniego rodzaju wymiennika. To od zanieczyszczeń zależy potrzeba okresowego mechanicznego czyszczenia wymiennika wewnątrz rur, lub po ich zewnętrznej stronie. Należy również przeanalizować możliwość czyszczenia chemicznego.

Po przeanalizowaniu otrzymanych informacji można przystąpić do procesu doboru cieplnego i materiałowego urządzenia. Proces ten prowadzi do zbilansowania energii wymienianej pomiędzy dwoma strumieniami przepływającymi przez wymiennik ciepła. Obliczenia należy więc przeprowadzić dla przepływu wewnątrz rur, jak i przestrzeni międzyrurowej, pamiętając przy tym że jakiegokolwiek zmiany geometrii urządzenia wpływają na przepływ po obydwu stronach.

3.2. Obliczenia dla przepływu wewnątrz rur.

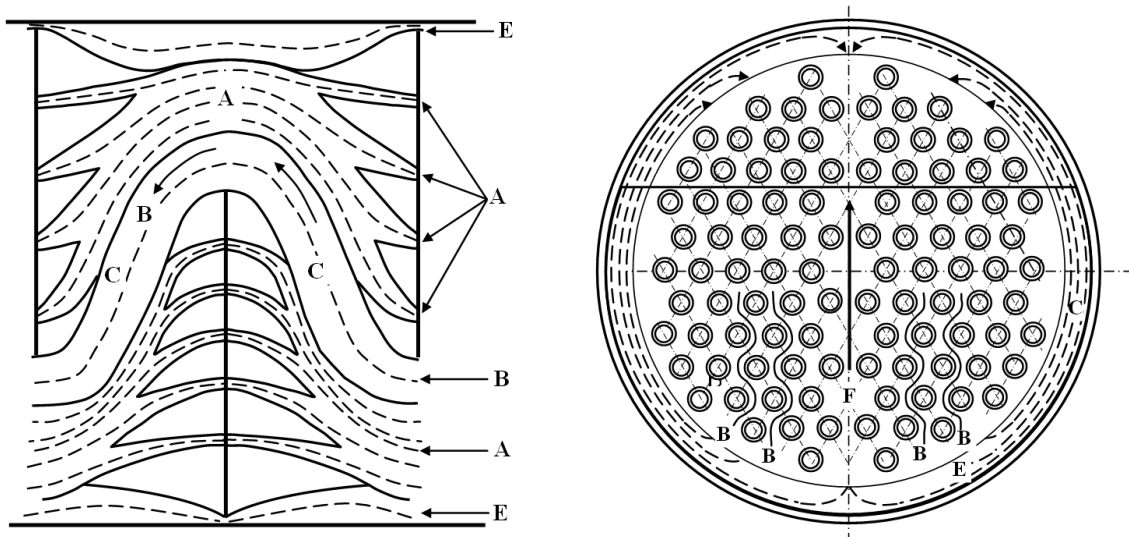
Obliczenia cieplne i przepływowe dla przepływu wewnątrz rur są prostsze niż obliczenia przepływu w przestrzeni międzyrurowej. Jest to związane z faktem, że przepływ w przewodzie prosto osiowym o przekroju kołowym jest dobrze poznany i opisywany w literaturze znacznie częściej od przepływu wokół rur. Współczynnik wnikania ciepła zależy tu głównie od prędkości przepływu płynu w rurze. Prędkość ta z kolei wpływa w znacznym stopniu na wielkość oporów przepływu płynu. Zadaniem projektanta jest jak najbardziej efektywne wykorzystanie powierzchni wymiany ciepła, tak aby przepływ odbywał się z możliwie jak największą prędkością nie przekraczając przy tym dozwolonych oporów przepływu dla których wykorzystanie wymiennika ciepła jest jeszcze opłacalne. Sposobem na wprowadzenie zmian prędkości przepływu, poza oczywistym zwiększeniem strumienia płynu, jest zmniejszanie przekroju przepływu. Odbywa się to przez dodanie przegród w komorach, przez co zwiększana jest liczba tak zwanych biegów. Podział komory na pół spowoduje, że płyn będzie przepływał z dwukrotnie większą prędkością. Dla konwekcji wymuszonej płynu jednofazowego współczynnik wnikania ciepła wewnątrz rur jest zależny od liczby Reynoldsa, Prandtla, oraz od przekroju rury, a więc analizując to od strony właściwości fizykochemicznych płynu: od lepkości, przewodności cieplnej i ciepła właściwego, prędkości przepływu, oraz średnicy rury [48].

Spadek ciśnienia jest silnie zależny od prędkości płynu. Dla przepływu burzliwego współczynnik wnikania ciepła zależy od prędkości do potęgi 0,8, podczas gdy spadek ciśnienia zmienia się prawie w kwadracie prędkości przepływu. Oprócz prędkości wpływ na wielkość oporów przepływu ma też długość rur. Tak więc po dodaniu przegrody dzielącej wymiennik na pół, prędkość przepływu wzrasta dwukrotnie, zatem opory rosną do potęgi 3. [84]. Wraz ze wzrostem prędkości przepływu, opory przepływu wzrastają bardziej dynamicznie niż intensywność wymiany ciepła. Prowadzi to do pewnej optymalnej prędkości przepływu płynu, powyżej której korzyść uzyskana z tytułu wysokiej wartości współczynnika wnikania ciepła jest niższa niż koszt energii potrzebnej do pokonania oporów przepływu. w literaturze nie ma jasno określonych wartości optymalnej prędkości przepływu. w pracy [84] zalecana prędkość przepływu cieczy waha się w granicach od 1,0 do 3,0 m/s. w pracy [48] zalecane prędkości dla gazu to 8 – 30 m/s, dla cieczy <1,5 m/s, jako wyjątek podano duże skraplacze siłowni w których prędkość wody chłodzącej dochodzi do 3 m/s. Według [103] prędkość wody i podobnych jej płynów wewnątrz rur powinna mieścić się

w granicach 0,9-2,4m/s. W praktyce może dojść do sytuacji w której uzyskana prędkość przepływu wewnątrz rur jest jeszcze daleka od optymalnej, lecz dodanie jednego więcej biegu powoduje jej przekroczenie. Należy w takim przypadku w miarę możliwości manewrować średnicą rur, czasami zaś średnicą płaszczu. Dla rur o mniejszej średnicy uzyskuje się wyższe wartości współczynnika wnikania ciepła i bardziej kompaktowy rozmiar wymiennika. Rury o większej średnicy powodują mniejsze wartości oporów przepływu i łatwiej je wyczyścić. W praktyce do budowy płaszczowo-rurowych wymienników stosuje się rury o średnicy zewnętrznej od $\frac{1}{4}$ do 2 cali (6,35 do 50,8 mm) [114]. w przypadkach gdy współczynnik wnikania ciepła po stronie płaszczowej jest znacznie niższy w porównaniu do strony rurowej, na przykład dla gazów, lub płynów o wysokiej gęstości, stosuje się przegrody, lub rury nisko żebrowane, w celu zwiększenia powierzchni wymiany ciepła po stronie płaszczowej.

3.3. Obliczenia dla przepływu w przestrzeni międzyrurowej.

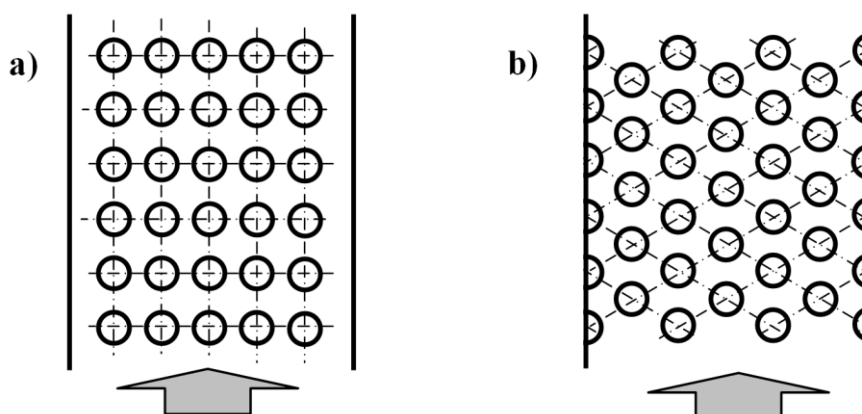
Obliczenia dla przestrzeni międzyrurowej są bardziej skomplikowane od tych jakie przeprowadza się dla przepływu wewnątrz rur, co przedstawia rysunek 3-5. Jest to związane z kilkoma czynnikami. Przede wszystkim geometria jest o wiele bardziej złożona niż przepływy w rurach. Przekrój poprzeczny swobodny przestrzeni międzyrurowej jest o 2,5 – 3 razy większy od przekroju przelotowego rur [84].



Rysunek 3-5. Rzeczywisty przepływ czynnika w przestrzeni międzyrurowej wymiennika ciepła z przegrodami segmentowymi (A – struga przepływająca przez pierścieniowe przegrody między rurami a otworami w przegrodach, B – struga opływająca krzyżowo wiązkę rur między kolejnymi oknami przegród, C – struga bocznikująca pomiędzy rurami a płaszczem, E – struga przepływająca przez prześwity między krawędzią przegrody a płaszczem, F – struga występująca w wymiennikach wielodrogowych) [120] [108]

Wokół pęku występuje struga przepływająca przez pierścieniowe przegrody między rurami a otworami w przegrodach, struga opływająca krzyżowo wiązkę rur między kolejnymi oknami przegród, struga bocznikująca pomiędzy rurami a płaszczem, struga przepływająca przez prześwity między krawędzią przegrody a płaszczem, oraz struga występująca w wymiennikach wielodrogowych. Również więcej czynników geometrycznych wymiennika wpływa na charakter przepływu wokół pęku rur.

Wiele korelacji dotyczących oporów przepływu i współczynników wnikania ciepła dotyczy przepływu przez idealny pęk rur. Przez idealny pęk rur rozumiemy taki, gdzie w każdym rzędzie występuje ta sama liczba rur o tej samej podziałce i w którym nie ma bocznikujących przepływów, układy takie obrazuje rysunek 3-6.



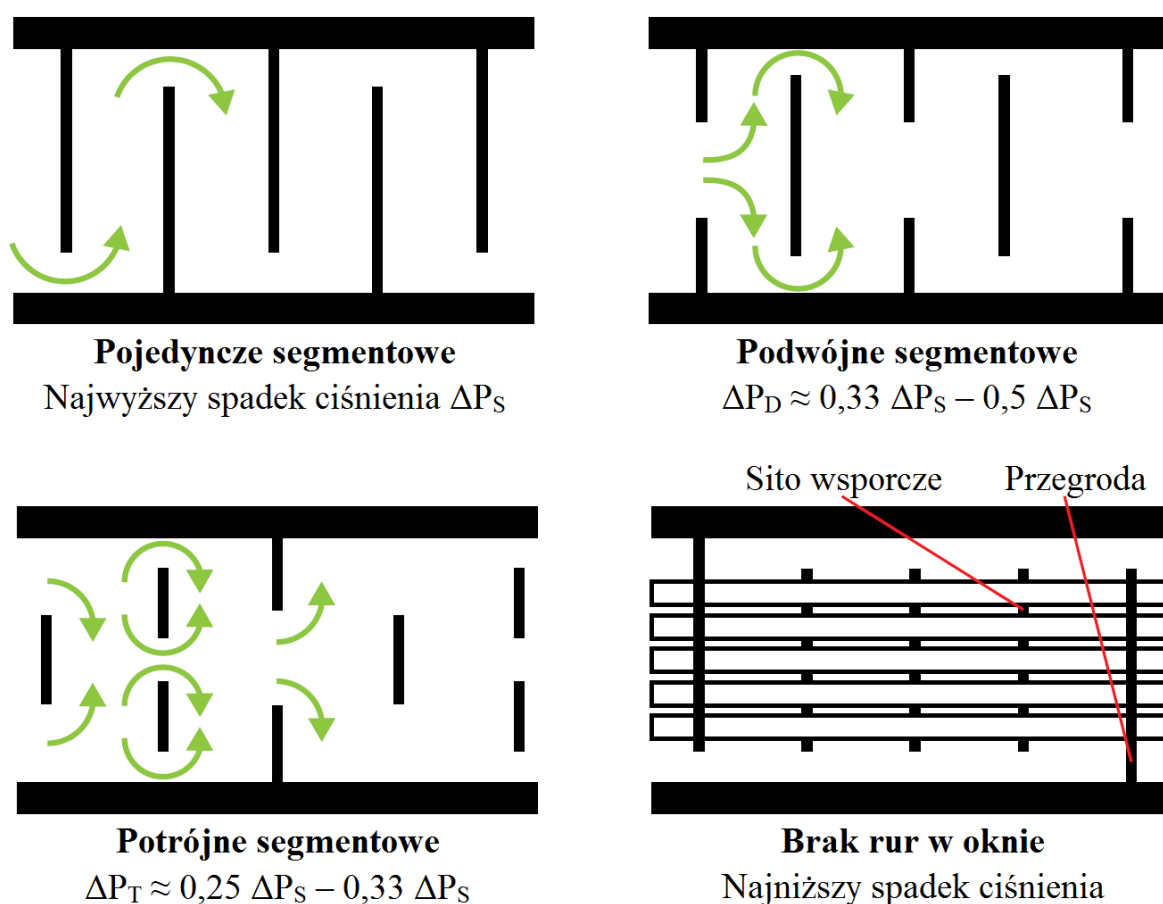
Rysunek 3-6. Idealny pęk rur w układach: a) prostokątnym szeregowym, b) trójkątnym szeregowym (obrócony) wg [108]

W rzeczywistym wymienniku ciepła z przegrodami poprzecznymi płaszcz zazwyczaj ma kształt cylindryczny, liczba rur w poszczególnych rzędach jest zmienna, a przepływ płynu z uwagi na to, że pomiędzy pękiem rur a płaszczem występują tak zwane luzy montażowe, większe są obszary powodujące bocznikowanie przepływu, a więc przepływ jest bardziej złożony od przepływu idealnego [109]. Analizie należy poddać różne konfiguracje płaszcza, układ pęku rur, podziałkę oraz rodzaj i rozmieszczenie przegród. Zastosowanie przegród powoduje zmianę kierunku przepływu płynu z osiowego na przepływ krzyżowy co powoduje wzrost współczynnika wnikania ciepła.

Jeszcze bardziej skomplikowany jest przepływ mieszaniny dwufazowej w przestrzeni międzyrurowej. Odległość między przegrodami, oraz wielkość strzałki wycięcia, mają znaczący wpływ na przepływ mieszaniny gaz-ciecz, oraz powstające niejednorodności w postaci stref stagnacji i cyrkulacji, co zbadała i opisała w swojej pracy Guziałowska [43].

Stosowane są przegrody o różnych geometriach, z których najpopularniejszymi są przegrody segmentowe. Wskazówki na temat stosowania przegród segmentowych można znaleźć w przepisach TEMA [114].

Inne stosowane przegrody to śrubowe (helikoidalne), dyskowe, czy przegrody rusztowe. Rysunek 3-7 przedstawia najpopularniejsze przegrody segmentowe typu TEMA. Zastosowanie mniejszych przestrzeni pomiędzy przegrodami powoduje wzrost ilości biegów, wzrost prędkości, przepływ płynu jest bardziej turbulentny, co intensyfikuje proces wymiany ciepła [60]. Mniejsza odległość między przegrodami intensyfikuje wymianę ciepła, lecz zwiększa wartość oporów przepływu. Zadaniem projektanta jest jak najbliższe rozmieszczenie przegród w taki sposób aby nie przekroczyć maksymalnego dozwolonego spadku ciśnienia. w literaturze brak jasnego kryterium określającego optymalną odległość między przegrodami.



Rysunek 3-7. Przegrody określone przez TEMA, porównanie spadku ciśnienia [16]

Tabela 3-2 Zestawienie zalet i wad różnych typów przegród

	Typ przegrody	Zalety	Wady / Ograniczenia
Przegrody typu TEMA	Pojedyncze segmentowe	Najwyższy współczynnik wymiany ciepła Najłatwiejsze do wytworzenia Najtańsze	Najwyższy spadek ciśnienia Nie mogą być użyte z lepкими płynami
	Podwójne segmentowe	Niższy spadek ciśnienia w porównaniu z pojedynczymi segmentowymi	Niższy współczynnik wymiany ciepła w porównaniu z pojedynczymi segmentowymi
	Potrójne segmentowe	Niższy spadek ciśnienia w porównaniu z podwójnymi segmentowymi	Niższy współczynnik wymiany ciepła w porównaniu z podwójnymi segmentowymi
	Brak rur w oknie	Wszystkie rury mają wsparcie co eliminuje wibracje Korzystniejszy stosunek spadku ciśnienia do współczynnika wnikania ciepła niż w przypadku przegród pojedynczych segmentowych	Wymagane jest zastosowanie większego płaszcza, co podnosi koszt wymiennika
Przegrody nie uwzględnione w TEMA	Śrubowe	Mniejsze zanieczyszczanie strony płaszczonej Brak, lub minimalna ilość stref stagnacji Brak, lub minimalna ilość wibracji rur	Trudność w produkcji Brak standaryzacji metod projektowania Znaczne wartości przepływu w obiegu boczniującym
	Dyskowe	Osiowo symetryczny rozkład przepływu. Minimalne wartości przepływu boczniującego Podobne wartości oporów przepływu co podwójne segmentowe, ale lepsza wymiana ciepła. Dobre rozwiązanie do aplikacji gaz/gaz	Droższe niż przegrody segmentowe Wymagana jest podziałka rur na sicie o radialnej geometrii, co często powoduje większe odstępy pomiędzy rurami, w skutek czego można upakować mniejszą ilość rur do płaszcza.
	Rusztowe	Zapewnione wsparcie dla rur Jednorodny rozkład przepływu Relatywnie niski opór przepływu Korzystny stosunek spadku ciśnienia do współczynnika wnikania ciepła	Relatywnie niskie wartości współczynnika wymiany ciepła. Wymagane są specyficzne podziałki rur

Kilku badaczy starało się takie kryterium określić, lecz propozycje oscylowały w dość dużych przedziałach; Taborek [113] sugerował rozstaw przegród w granicach 20%-100% średnicy płaszczu, natomiast Mukherjee [84] określił tę wartość w granicach 30%-60% średnicy płaszczu. Zagadnienie doboru przegród i opis ich wpływu na charakterystykę wymiennika ciepła można znaleźć w pracy Bouhairie [16]. W pracy tej autor podjął się również zestawienia i porównania zalet i wad poszczególnych typów przegród, zestawienie to przedstawia tabela 3-2. Ocenę wpływu wybranych parametrów geometrycznych, które charakteryzują przestrzeń międzyrurową na opory przepływu płynu jednofazowego przeprowadził Skoczylas [108]. Prowadził od badania przepływu poprzez idealne i rzeczywiste pęki rur. Wyniki pracy autor przedstawił w formie graficznej uzależniając całkowity spadek ciśnienia od prędkości przepływu czynnika przez wymiennik bez przegród, bądź od liczby Reynoldsa.

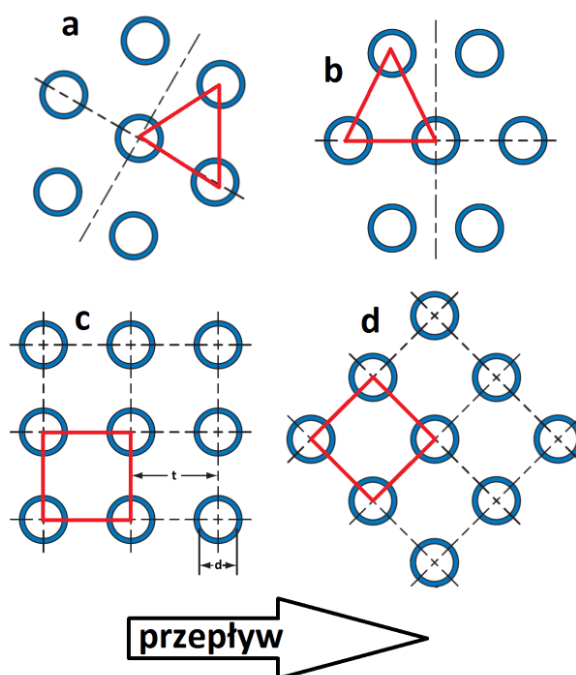
Wyniki obliczeń miały na celu ocenę wpływu następujących parametrów na opory przepływu:

- szczeliny między przegrodą a płaszczem,
- szczeliny pomiędzy przegrodą a rurkami,
- strzałki wycięcia przegrody,
- liczby przegród,
- długości wymiennika przy nieziennej liczbie przegród,
- długości wymiennika przy nieziennej odległości między przegrodami,
- rodzaju wkładu rurowego.

Poddając analizie wyniki badań i pamiętając, że opory wlotu i wylotu zależne od średnicy króćca wlotowego i wylotowego mogą sięgać nawet do 70% oporów całkowitych przepływu autor dokonał uszeregowania wybranych parametrów geometrycznych pod względem ich oddziaływania na spadki ciśnienia w wymienniku:

- liczba przegród,
- strzałka wycięcia,
- szczelina pomiędzy przegrodą a rurką,
- długość wymiennika.

Wpływ pozostałych parametrów na opory przepływu w przebadanym zakresie był nieznaczny. Wpływ na charakter i właściwości przepływu ma również układ rur.



Rysunek 3-8. Najczęściej stosowane układy rur a) 30° ; b) 60° ; c) 90° ; d) 45°

W niektórych przypadkach zastosowanie przestawnego układu rur zwiększa współczynnik wnikania ciepła o 25% w porównaniu do układu szeregowego [114]. Poza faktem, że układ przestawny jest wydajniejszy, układ rur należy dobrać tak aby upakować jak najwięcej rur w płaszczu nie przekraczający maksymalnej dozwolonej średnicy. Ważny jest również możliwy dostęp dla mechanicznego czyszczenia zewnętrznej powierzchni rur, jeżeli charakter przepływu stawia takie wymagania. Najczęściej stosowane układy rur przedstawia rysunek 3-8. Dla identycznych podziałek rur t/d oraz tych samych parametrów przepływu, układy te można przedstawić w kolejności od najmniej do najbardziej wydajnego: 30° , 45° , 60° , 90° . Kolejność ta byłaby odwrotna jeżeli za kryterium przyjmimy spadek ciśnienia [65]. Układy trójkątne pozwalają na upakowanie 15% więcej rur niż przypadku układów kwadratowych [101], lecz trudniej je czyścić mechanicznie, w związku z tym stosuje się je w układach tego niewymagających, lub w takich gdzie czyszczenie chemiczne jest dozwolone i wystarczające. w przypadku wytwornic pary zaleca się stosowanie układów kwadratowych równoległych (90°), które zapewniają lepsze odprowadzenie powstającej fazy gazowej, przez co praca takiego układu jest stabilniejsza [103].

3.4. Podsumowanie

Obecna sytuacja na rynku, przepływ informacji, silna konkurencja, czy rosnące ceny materiałów to czynniki które powodują, że firma która nie dysponuje wysoce rozwiniętym zapleczem inżynierskim nie ma szans na utrzymanie się na rynku. Niezależnie od tego jakie mamy do dyspozycji oprogramowanie, istnieją pewne zasady projektowania, których należy się trzymać chcąc efektywnie projektować wymienniki ciepła [84].

- Należy w jak najwcześniejszym etapie projektu systemu przewidzieć i dobrać wymienniki ciepła.
- Należy unikać przesadnej ostrożności. Obliczanie wymiennika dla wyższych niż zakładane temperatur przy znacznie mniejszych niż zakładane oporach przepływu czy innych założeniach bezpieczeństwa.
- Dążąc do 100% efektywności wymiany ciepła, wymiary wymiennika osiągają nieskończoność. Innymi słowy, aby podnieść efektywność wymiennika z 80% do 90% musimy wykorzystać znacznie więcej powierzchni wymiany ciepła niż w przypadku jej zwiększania z 70% na 80%.
- Szukając sposobu zwiększenia intensywności wymiany ciepła należy wziąć pod uwagę zwiększenie mocy pompy tłoczącej płyn, zamiast zwiększać gabaryty wymiennika ciepła. Zwiększy to dopuszczalne wartości spadku ciśnienia, zwiększy prędkość przepływu płynu, turbulencje i współczynnik wnikania ciepła.
- W celu uzyskania maksymalnej wydajności w jak najmniejszej objętości płaszcza, należy stosować rury o najmniejszych możliwych średnicach, pamiętając przy tym o możliwości zabrudzenia się a w konsekwencji zatykania rur.
- Należy gdy to możliwe prowadzić do jak największego zaburzenia strugi płynu przez zastosowanie różnego rodzaju przeszkód, zawirowywaczy, czy turbulizatorów, mając na uwadze ich wpływ na wzrost oporów przepływu.

Stosowanie powyższych zasad to połowa sukcesu. Aby dobrze zaprojektować wymiennik ciepła, projektant musi mieć do dyspozycji odpowiednie narzędzie dające pewne wyniki obliczeń. w praktyce istnieje wiele przypadków w których należy założyć pewne wartości, na przykład gdy płyn jednofazowy podczas odparowania zmienia się w dwufazowy. Aby założeń tych było jak najmniej co zwiększy dokładność obliczeń, ważnym jest dobre poznanie zjawisk towarzyszącym przepływowi dwufazowemu wokół pęku rur.

4. Opis metod badawczych

O ile dla przepływu jednofazowego obecność rury wywołuje niejednorodność w przepływie płynu, to jednorodność własności płynu nie budzi wątpliwości. w przypadku przepływu strugi dwufazowej w przestrzeni międzyrurowej pojawiają się struktury przepływu, które wyraźnie odbiegają od tych dla przepływu wewnątrz rury. Celowym jest zatem identyfikacja na ile asymetria rozkładu wymiany ciepła na obwodzie rury wynika z samej obecności przeszkody, oraz czy decyduje o tym asymetryczny rozkład faz wokół opływanej rury. Dotychczas stwierdzono, obserwując przepływ mieszaniny dwufazowej poprzeczny do rury w pęku występowanie tam stref martwych.

4.1. Wprowadzenie

Elementem odróżniającym niniejszą pracę od innych jej podobnych jest jednoczesne połączenie metody wizualizacji przepływu płynu a konkretnie mieszaniny dwufazowej wokół pęku rur z pomiarem i wyznaczeniem współczynnika wnikania ciepła na powierzchni tych rur metodami bezinwazyjnymi. Dzięki wizualizacji przepływu płynów za pomocą pól prędkości w ośrodku o zmiennej geometrii możliwe jest określenie wpływu parametrów geometrycznych, czy ogólnych wartości strumieni poszczególnych płynów na lokalne prędkości w określonych badanych obszarach. Aby badanie tych zależności miało sens, niezbędne jest również określenie wpływu wyznaczonych prędkości na rzeczywiste wartości współczynnika wnikania ciepła. Techniki pomiaru prędkości cieczy w układach dwufazowych nie różnią się znacznie od tych stosowanych zazwyczaj w układach jednofazowych. Najpopularniejsze metody nieinwazyjne to [133]:

- LDV (ang. Laser Doppler Velocimetry),
- LIPA (ang. Laser Induced Photochemical Anemometry),
- CARPT (ang. Computer Automated Radioactive Particle Tracking),
- DPIV (ang. Digital Image Particle Velocimetry).

LDV to technika stosowana do pomiaru chwilowej prędkości przepływu płynu może zmierzyć wszystkie trzy składowe prędkości. Prędkościomierz laserowy Dopplera wysyła monochromatyczną wiązkę lasera w kierunku celu i mierzy promieniowanie odbite. Zgodnie z efektem Dopplera, zmiana długości fali odbijanego promieniowania jest funkcją prędkości względnej obiektu. Zatem prędkość obiektu może być wyznaczona przez pomiar zmiany

długości fali odbitej światła laserowego, które jest wykonywane przez tworzenie tak zwanego wzoru prążków interferencji (to znaczy nakłada się i porównuje wysłany i odbity sygnał) [97]. W obszar badawczy układów do pomiaru metodą LDV dodaje się cząstki znacznikowe których zadaniem jest rozszczepienie wiązki światła laserowego o znanej częstotliwości. Rozproszone światło jest wykrywane przez przyrząd generujący prąd o wartości proporcjonalnej do pochłoniętej energii fotonów, a następnie wzmacnia ten prąd. Różnica między częstotliwością światła wysłanego i rozproszonego nazywa się przesunięciem Dopplera. Poprzez analizę przesunięcia częstotliwości fal Dopplera, kąta przesunięcia wiązek lasera, oraz długości fal, może zostać określona miejscowa prędkość płynu [2] [133].

LIPA jest również techniką opartą na obserwacji przemieszczania się znaczników dodanych do badanego płynu, jednak w tym przypadku do mieszaniny dwufazowej dodaje się chemicznych składników świecących pod wpływem światła laserowego [34].

CARPT podobnie jak opisane wcześniej metody jest techniką znacznikową, jednak w tym przypadku stosowane cząstki są radioaktywne. Na około obszaru badawczego rozmieszcza się detektory sodowo jonowe, których zadaniem jest monitorowanie natężenia promieniowania w układzie, co pozwala na określenie położenia cząstek. Ruch cząstki jest rejestrowany przez pewien okres czasu, następnie z wykorzystaniem krzywych kalibracyjnych ustalane jest położenie cząstki w czasie próbkowania. Znając różnice czasowe rejestracji kolejnego położenia trasera oraz jego położenie – możliwe jest wyznaczenie jego prędkości [28]. Khopkar i inni [62] za pomocą metody CARP zbadali przepływ mieszaniny gazu i cieczy, a wyniki porównali z obliczeniami numerycznymi CFD.

Do wizualizacji przepływu płynów na potrzeby niniejszej pracy, najodpowiedniejszą wydaje się być cyfrowa anemometria obrazowa DPIV. Zastosowanie tej metody z wykorzystaniem funkcji korelacji krzyżowej umożliwia pracę przy wysokich gradientach prędkości, przy nierównomiernym rozkładzie cząstek znacznikowych, czy niedokładnym oświetleniu [90]. Szczegółowy opis metody DPIV znajduje się w rozdziale 4.2.

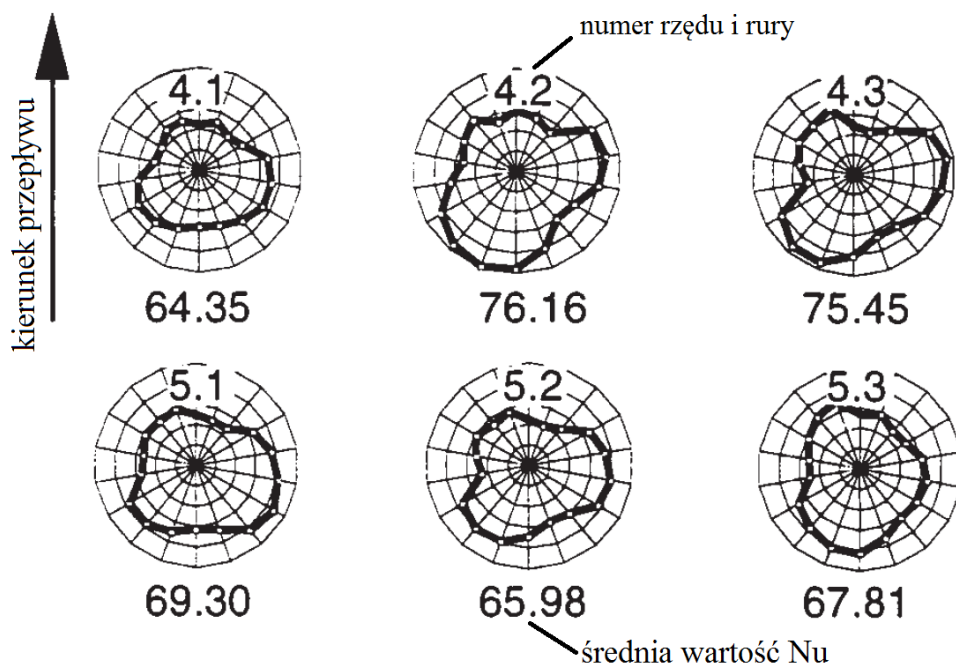
Gdy określenie intensywności wymiany ciepła poprzez pomiar bezpośredni jest utrudnione, lub niemożliwe do zrealizowania z pomocą przychodzą techniki badawcze oparte na analogii transportu masy i ciepła. Jako pierwszy teorię podobieństwa w badaniach ruchu ciepła wykorzystał Nusselt w 1910 roku.

Współcześnie znanych i wykorzystywanych jest kilka metod wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła na drodze analogii z których wymienić należy:

- Metoda sublimacji,
- Metoda absorpcyjna,
- Metoda elektrochemiczna.

Przy zastosowaniu metody sublimacji średni współczynnik wymiany masy można wyznaczyć poprzez pomiar ilości wysublimowanego materiału – czyli jego ubytek. Jako materiał można wykorzystać różne substancje takie jak suchy lód, paradichlorobenzen, czy naftalen, przy czym ten ostatni jest najlepszym wyborem. Naftalen jest substancją o małej toksyczności, poddaje się obróbce mechanicznej, badania z jego użyciem mogą być prowadzone w temperaturze pokojowej, jest łatwo dostępny i ma dogodną wartość liczby Schmidta [9]. Gęstość strumienia wysublimowanego naftalenu jest analogiczna do gęstości strumienia ciepła, a gradient stężenia naftalenu w powietrzu jest analogiem gradientu temperatury. Zapewnienie odpowiednich warunków podczas pomiarów pozwala na określenie gradientu stężenia naftalenu, a pomiar ilości wysublimowanego naftalenu pozwala na określenie gęstości strumienia naftalenu [9]. Należy tu wymienić pracę Cho i innych [21] którzy badali model wirującego dysku symulującego dyski stosowane w pamięciach masowych komputerów. Podczas badań autorzy połączyli metodę wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła poprzez sublimację naftalenu, z wizualizacją przepływu powietrza wokół dysku z wykorzystaniem anemometrii Dopplera (LDA). Również Cho i inni [22] [23] wykorzystali sublimację naftalenu do badań łopatek turbin gazowych w wirującym kanale. Kalisz i Pronobis [56] wykorzystali technikę sublimacji naftalenu do badań nad konwekcyjną wymianą ciepła w modelu generatora pary.

Możliwe jest również wyznaczenie intensywności wymiany masy podczas przenikania masy z fazy gazowej do ciekłej – mówimy wtedy o metodzie absorpcyjnej. Li i Kottke stosowali metodę sublimacji do badań intensywności wymiany ciepła w przestrzeni międzyrurowej. [72] [70] [71] [73] [74]. Badane rury umieszczone w pęku pokrywali mokrą bibułą filtracyjną nasączoną roztworem chlorku manganu z nadtlenkiem wodoru. Badacze dodawali do strumienia powietrza amoniak który był absorbowany na powierzchni nasączonej bibułki. Różnice koncentracji absorbowanego amoniaku odzwierciedlały intensywność wymiany masy na powierzchni rurek. Ocenę wartości koncentracji amoniaku wykonano poprzez pomiar intensywności koloru bibułki.



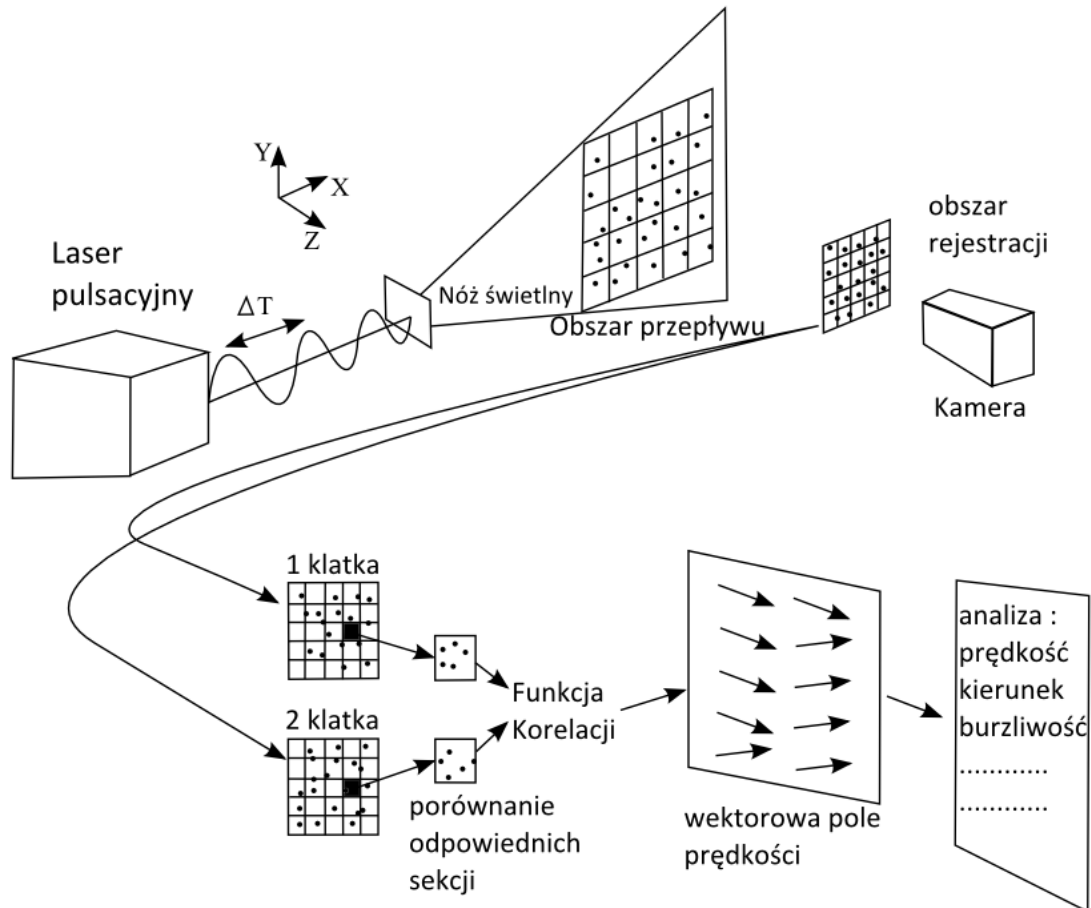
Rysunek 4-1. Rozkład wartości liczb Nusselta na powierzchni rur umieszczonych w pęku [72]

Do badań wymiany ciepła przeprowadzonych na potrzeby niniejszej pracy, najodpowiedniejszą wydaje się być metoda elektrochemiczna, jej szczegółowy opis znajduje się w rozdziale 4.3.

4.2. Cyfrowa Anemometria Obrazowa DPIV

Cyfrowa Anemometria Obrazowa (ang. Digital Particle Image Velocimetry) DPIV jest optyczną metodą wizualizacji przepływu płynów, służy do wyznaczania chwilowych wektorowych pól prędkości. DPIV jest rozwinięciem techniki PIV z zastosowaniem której pierwsze badania przeprowadzono w latach 70 ubiegłego wieku. Zmiana ta dotyczyła głównie zastosowania w badaniach technik cyfrowych, którymi zastąpiono przestarzałe i czasochłonne techniki oparte na fotografii analogowej [133]. Zasada pomiaru jednak pozostaje niezmienna, a jej podstawą jest wprowadzenie w obszar przepływu cząstek znacznikowych, których zadaniem jest odzwierciedlenie ruchu płynu. Pola prędkości powstają dzięki analizie przesunięcia cząstek znacznikowych na dwóch kolejnych obrazach przepływu zarejestrowanych w krótkim odstępie czasu. Gdy znana jest częstotliwość rejestracji obrazów, oraz długość przesunięcia się cząstek, możliwe jest wyznaczenie kierunku i prędkości.

Opis techniki DPIV od podstaw, jej aspekty techniczne, optyczne i praktyczne przykładów zastosowania, można znaleźć między innymi w pracach [1] [123] [15] [98] [55] [133].



Rysunek 4-2. Typowy układ do badań metodą PIV

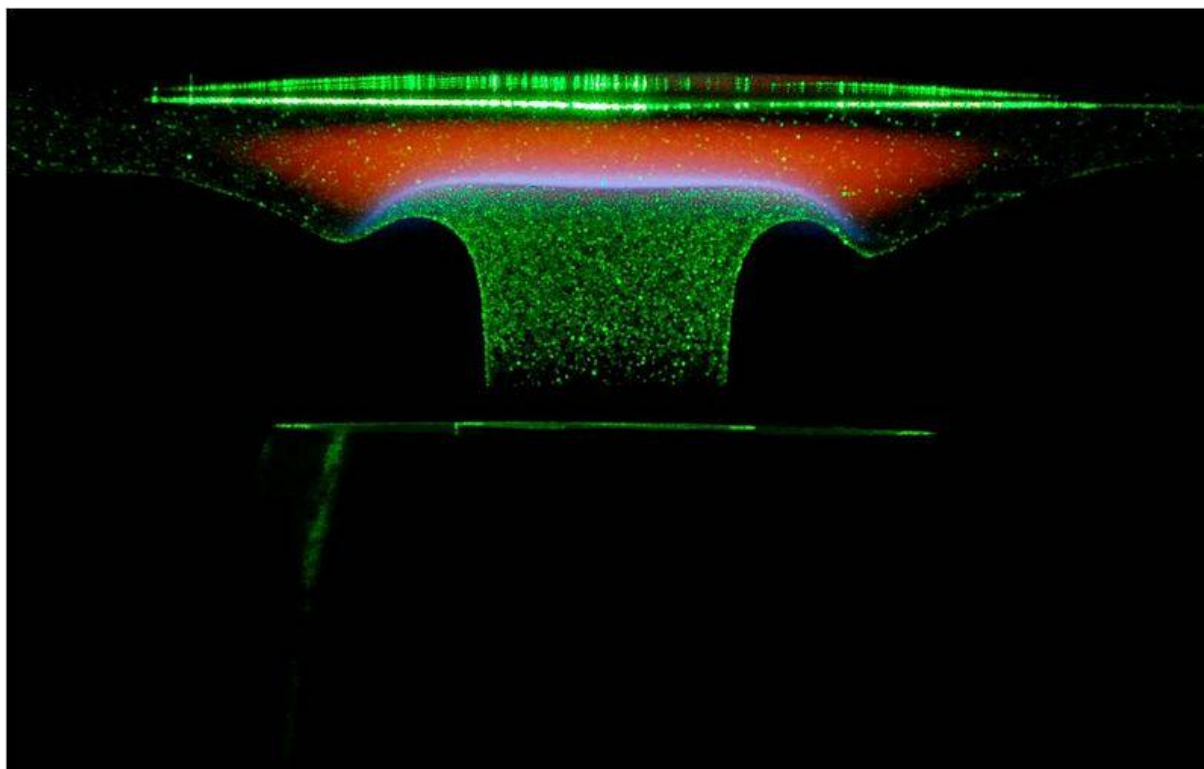
Typowy układ do zastosowania metody DPIV zawiera kanał pomiarowy w którym zachodzi przepływ płynu w obszar którego dodano cząstki znacznikowe. Obszar przepływu oświetlany jest światłem, a przepływ oświetlonych cząstek rejestrowany jest kamerą o wysokiej częstotliwości rejestracji obrazów. Układ taki przedstawia rysunek 4-2.

Pierwsze badania z wykorzystaniem technik PIV odbywały się z wykorzystaniem analogowych technik fotograficznych. w związku z tym że techniki te nie pozwalały na rejestrację zdjęć z wysoką częstotliwością, oświetlony obszar przepływu rejestrowany był na pojedynczej klatce. Takie rozwiązanie nie pozwalało na określenie, który obraz był rejestrowany pierwszy a który ostatni, przez co nie możliwe było jednoznaczne wyznaczenie kierunku (zwrotu) wektora przesunięcia się cząstki. Obecnie do rejestracji obrazów techniką DPIV wykorzystywane są kamery cyfrowe o wysokiej częstotliwości rejestracji obrazu, dzięki czemu dane z pomiarów mają postać wielu obrazów rejestrowanych w znanym odstępie czasowym [133]. Obrazy zarejestrowane w trakcie pomiaru są dzielone na małe regiony zwane dalej sekcjami. Wielkość sekcji jest definiowana w zależności od

rozdzielczości i wielkości badanej przestrzeni, tak aby uzyskać odpowiednie przesunięcie cząstek znacznikowych. w porównywanym regionach muszą występować wspólne cząstki. w innym przypadku uzyskamy tylko przypadkowy szum zamiast wymaganego piksu korelacji. Przy zmniejszeniu częstotliwości rejestracji obrazów, czyli przy zwiększeniu czasu ΔT pomiędzy poszczególnymi klatkami wzrasta dokładność pomiaru i zasięg dynamiki procesu. Jednak zwiększanie ΔT powoduje zmniejszenie prawdopodobieństwa występowania wspólnych cząstek na kolejnych obrazach, co prowadzi do powstawania niepożądanego szumu. Zalecane jest stosowanie sekcji o wymiarach 32 na 32 piksele przy założeniu, że maksymalne przesunięcie cząstek wynosi jedną trzecią tej wartości, co pozwoli na zachowanie wysokiej dokładności i odpowiedniej dynamiki dla pomiarów DPIV [55]. Następnie rozmieszczenie cząstek znacznikowych w poszczególnych regionach badawczych z pierwszego obrazu jest poszukiwane na kolejnym z wykorzystaniem funkcji korelacji. Jeżeli do rejestracji obrazów zastosowano technikę rejestracji przepływu na pojedynczej klatce, wtedy do wyznaczenia przesunięcia cząstek znacznikowych wykorzystuje się funkcję autokorelacji. Przy zastosowaniu metody rejestracji na wielu klatkach, do wyznaczenia średniego przesunięcia obrazów cząstek zawartych w sekcjach wykorzystuje się metodę korelacji krzyżowej CCF (Cross Correlation Function). Funkcję tą można wyliczyć bezpośrednio z wykorzystaniem technik numerycznych. Obliczenia te można też wykonać pośrednio ale znacznie szybciej osiąga się to wykorzystując twierdzenie Wienera-Kinchina, mówiące że funkcje autokorelacji i gęstości widmowej mocy danego sygnału są sobie równoważne i powiązane wzajemnie transformatą Fouriera [7].

Zadaniem cząstek znacznikowych jest wizualizacja ruchu płynu. Ich rozmieszczenie powinno być jednolite i równomierne. Odpowiednio dobrane cząstki znacznikowe zachowują się jak cząstki płynu. Powinny być tak dobrane zarówno pod względem wielkości jak i składu chemicznego, żeby nie miały wpływu na charakter przepływu, nie wchodziły z płynem w reakcje i nie tworzyły konglomeratów. Dodatkowo nie mogą ulegać korozji, a ich właściwości fizyko chemiczne powinny być dla płynu obojętne. Podstawowy wybór cząstek znacznikowych dotyczy ich wielkości. Powinny być na tyle niewielkie aby ich przepływ był zgodny z przepływem płynu i jednocześnie wystarczająco duże żeby odbijać światło. Maksymalna dozwolona średnica cząstek znacznikowych maleje wraz ze wzrostem prędkości i turbulencji płynu. Zaleca się kontrolę ilości, wielkości i koncentracji cząstek znacznikowych. Przykładem materiałów stosowanych jako cząstki znacznikowe mogą być polistyren, aluminium, czy magnez. Dokładny opis i zestawienie używanych materiałów

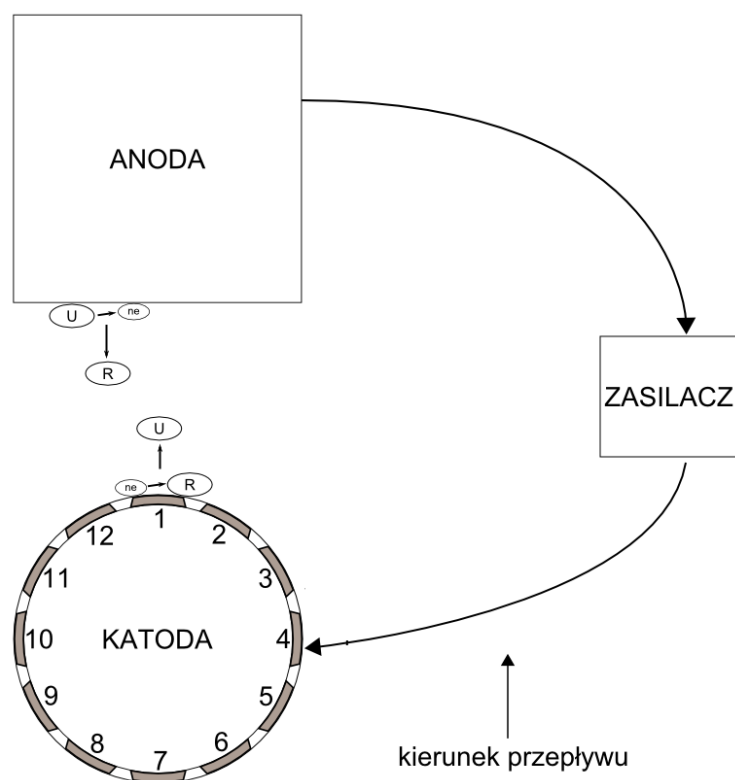
można znaleźć w pracy [98]. Rysunek 4-3 przedstawia przykład cząstek znaczkowych obrazujących zachowanie się płomienia nad palnikiem przy spalaniu metanu [4].



Rysunek 4-3. Przykład zastosowania cząstek znaczkowych przy spalaniu metanu [4]

4.3. Pomiar współczynnika wymiany masy z zastosowaniem metody elektrolitycznej

Metoda elektrochemiczna, zwana również elektrolityczną jest metodą badawczą służącą do określenia wartości współczynnika wnikania ciepła pośrednio poprzez pomiar wymiany masy z wykorzystaniem analogii wymiany masy i ciepła. Pierwsze badania z wykorzystaniem tej metody przeprowadzono w latach 50 ubiegłego wieku [77]. Schematyczny opis procesu elektrochemicznego przedstawia rysunek 4-4. Zdysocjowany wodny roztwór elektrolitu przepływa z charakterystyczną prędkością omywając elektrody umieszczone w obszarze przepływu. Elektrody są odizolowane zarówno od siebie, jak i innych elementów konstrukcyjnych czy mechanicznych stanowiska pomiarowego. w elektrolicie występują jony R mogące się redukować przy katodzie, jony U mogące utleniać się przy anodzie oraz inne, nie biorące udziału w procesie.



Rysunek 4-4. Proces elektrochemiczny

Po podłączeniu zewnętrznego źródła prądu stałego, o dobrze stabilizowanym napięciu, pomiędzy elektrodami powstaje obwód elektryczny z przewodnikiem jonowym. Na anodzie zachodzi deelektronizacja, a na katodzie elektronizacja jonów. Dzięki tym procesom zachodzącym na granicy metal – elektrolit, w zewnętrznym obwodzie ma miejsce przepływ prądu o danym natężeniu I . Występujące reakcje przy których zachodzi transport ładunku elektrycznego przez granicę faz noszą nazwę reakcji przejścia, a ich szerszy opis można znaleźć w pracy [11].

Prąd elektryczny i płynący w obwodzie określa szybkość procesów zachodzących przy elektrodach. Zgodnie z prawem Faradaya

$$I = iA = nFNA \quad (4-1)$$

Ciągłość przepływu prądu w zewnętrznym obwodzie jest zależna od stałego dopływu jonów na granicę faz. Przenoszenie się ładunków (gęstość strumienia jonów) jest spowodowane przez trzy mechanizmy: dyfuzję, migrację i konwekcję, co można przedstawić następującym równaniem:

$$N = -(D + \varepsilon_D) \frac{\partial C}{\partial y} - nC(D + \varepsilon_\phi) \frac{F}{RT} \frac{\partial \phi}{\partial y} + wC \quad (4-2)$$

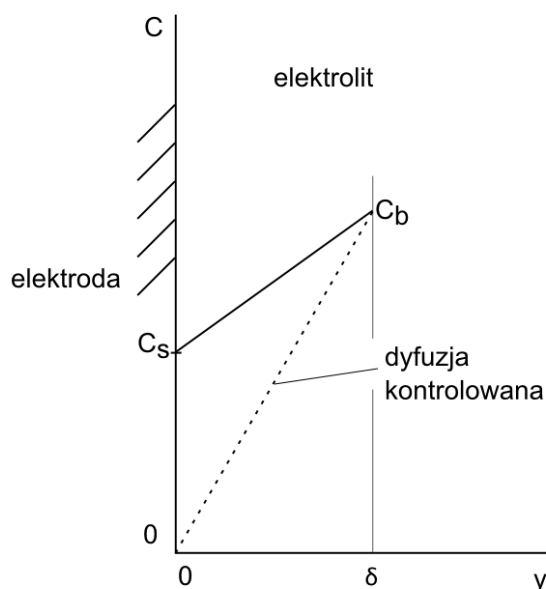
Ostatni z tych składników, konwekcyjny, jest pomijalny. Jego wpływ w warunkach elektrolizy nie przekracza 0,3% [128]. Drugi składnik, wielkość migracji jonów, może być wyeliminowany poprzez wprowadzenie do badanego elektrolitu tzw. elektrolitu podstawowego, którego stężenie powinno być większe od badanego od 40 do 100 razy [11]. W przypadku niniejszej pracy jako elektrolit podstawowy wykorzystano roztwór wodorotlenku sodu. Po wyeliminowaniu wpływu konwekcji i migracji jonów na transport ładunków na powierzchni elektrod, pozostał tylko jeden znaczący warunek, mianowicie dyfuzja jonów:

$$N \approx -(D + \varepsilon_D) \frac{\partial C}{\partial y} \quad (4-3)$$

Zgodnie z tą zależnością wartość gęstości strumienia reagujących jonów jest zależna od gradientu stężenia reagujących jonów. Po wykorzystaniu modelu Nersta do opisu transportu jonów otrzymamy równanie:

$$\frac{\partial C}{\partial y} = \frac{C_b - C_s}{\delta} \quad (4-4)$$

Model Nersta rozkładu stężenia jonów w warstwie dyfuzyjnej przedstawia rysunek 4-5. W modelu tym założono liniowy spadek stężenia reagujących jonów w warstwie dyfuzyjnej.



Rysunek 4-5. Model Nernsta rozkładu stężenia jonów w warstwie dyfuzyjnej wg [11]

Średnia grubość warstwy dyfuzyjnej jest zależna od współczynnika dyfuzji D i współczynnika wymiany masy h_D :

$$\delta = \frac{D}{h_D} \quad (4-5)$$

Dlatego

$$\frac{\partial C}{\partial y} = \frac{h_D(C_b - C_s)}{D} \quad (4-6)$$

Po uwzględnieniu równania (4-3) oraz przyjęciu wartości $\varepsilon_D=0$ dla nieruchomej warstwy dyfuzyjnej otrzymamy:

$$N = -h_D(C_b - C_s) < 0 \quad (4-7)$$

Znak minus wynika z przeciwnego do osi y kierunku poruszania się jonów. Gęstość natężenia prądu można potraktować jako wartość bezwzględną, wówczas po wstawieniu zależności (4-8) do (4-1) otrzymamy:

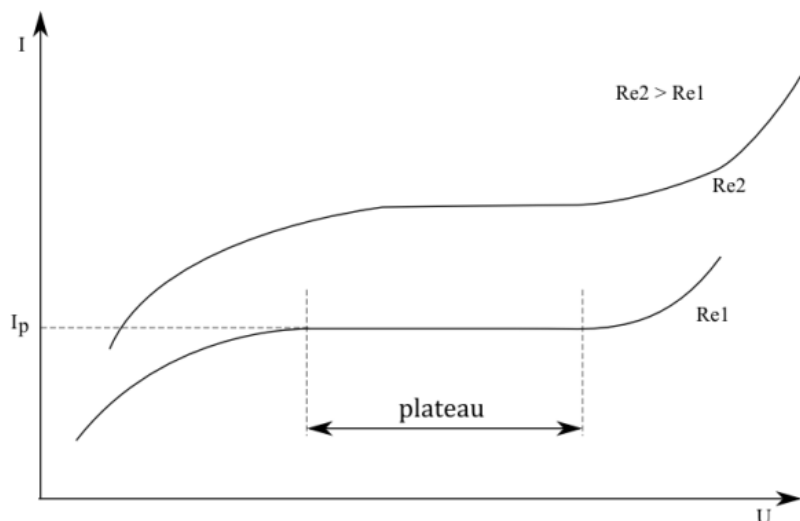
$$I = nFh_D A(C_b - C_s) \quad (4-8)$$

Równanie to po odpowiednim przekształceniu może być stosowane do wyznaczenia współczynnika wymiany masy w warunkach dyfuzji kontrolowanej na podstawie wartości jonów uczestniczących w reakcji elektrodowej w masie elektrolitu i na powierzchni elektrody. Dla określonego procesu katodowego istnieje potencjał przy którym C_s zmniejszy się do zera. w takim przypadku mamy do czynienia z dyfuzją kontrolowaną, dla której natężenie prądu jest maksymalne i nie zmienia się wraz ze wzrostem napięcia. Wartość takiego natężenia nosi nazwę natężenia prądu granicznego, lub natężenia plateau. Współczynnik wymiany masy można wyznaczyć z równania:

$$h_D = \frac{I_p}{nFAC_b} \quad (4-9)$$

Oznacza to że do wyznaczenia współczynnika wymiany masy na powierzchni elektrody o znanej powierzchni potrzebne są wartości stężenia jonów w roztworze C_b , oraz wartość natężenia prądu plateau I_p . Wartość C_b można wyznaczyć metodą miareczkowania potencjometrycznego, które polega na pomiarze SEM (siły elektromotorycznej) odpowiednio zestawionego ogniwa [27]. Wartość I_p wyznacza się na podstawie krzywej polaryzacyjnej przedstawiającej zależność zmian wartości natężenia prądu od jego napięcia. Początkowo

wraz ze wzrostem napięcia w układzie, rośnie również wartość natężenia prądu. Jednak gdy dochodzi do dyfuzji kontrolowanej jonów na powierzchni elektrody, wartość natężenia prądu jest stała i równa I_p .



Rysunek 4-6. Krzywa polaryzacyjna dla dyfuzji kontrolowanej

Kształt i położenie krzywej polaryzacyjnej jest zależny od grubości dyfuzyjnej warstwy Nersta, a co za tym idzie od wartości liczby Reynoldsa. Wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa maleje grubość warstwy Nersta aż dochodzimy momentu dla którego nie wystąpi odcinek plateau. Wartość liczby Reynoldsa powyżej której nie występuje I_p nazywamy wartością krytyczną Re_{kr} i jest ona cechą indywidualną dla geometrii badanego modelu i rodzaju zastosowanego układu elektrochemicznego. Należy również pamiętać o tym aby pomiary przeprowadzać w stałej temperaturze, gdyż wraz ze wzrostem temperatury rośnie wartość prądu granicznego. Temperatura ma bezpośredni wpływ na lepkość roztworu elektrolitu, z kolei wartość współczynnika dyfuzji rośnie, gdy lepkość maleje.

5. Cel i zakres pracy

Na podstawie studiów literaturowych, dotyczących przepływu mieszaniny dwufazowej gaz-ciecz wokół pęku rur zaobserwowano, iż istnieje niewiele informacji dotyczących bezpośredniego wpływu charakteru przepływu oraz towarzyszących mu zjawisk na intensywność wymiany ciepła. w dotychczas opublikowanych pracach skupiano się na określeniu wpływu geometrii, lub wartości strumieni przepływu na hydrodynamikę przepływu, lub wartość współczynnika wnikania ciepła. w żadnej jednak pracy nie wykonano jednoczesnej wizualizacji przepływu mieszaniny dwufazowej z pomiarem intensywności wymiany ciepła.

Na tej podstawie za cel użyteczny pracy przyjęto, zbadanie wpływu hydrodynamiki przepływu mieszaniny dwufazowej wokół pęku rur na wielkość i rozkład współczynnika wnikania ciepła na powierzchni tych rur.

Dokonano tego poprzez ocenę wpływu parametrów geometrycznych pęku rur, oraz strumieni poszczególnych faz na ewolucję pól prędkości płynów, oraz ich wpływ na wielkości lokalnych wartości liczby Nusselta na powierzchni rur.

Jako cel poznawczy można określić jednoczesną wizualizację przepływu mieszaniny dwufazowej wokół pęku rur metodą DPIV połączoną z ilościową i jakościową analizą procesów wymiany ciepła z wykorzystaniem metody elektrochemicznej.

Zakres pracy obejmował:

- projekt oraz budowę stanowiska badawczego,
- wykonanie układu pomiarowo-rejestrującego wraz ze sterującym oprogramowaniem,
- wizualizację procesu przepływu w przestrzeni międzyrurowej,
- wykorzystanie technik korelacyjnych, do wyznaczenia pól prędkości mieszaniny dwufazowej,
- analizę porównawczą badań własnych z wynikami istniejących metod obliczeniowych.
- wizualizację rozkładu liczby Nusselta na powierzchni rur,
- wykorzystanie zasad analogii przepływu masy i ciepła do określenia intensywności wymiany ciepła,
- identyfikację stref stagnacji, oraz ocenę ich wpływu na intensywność wymiany ciepła,

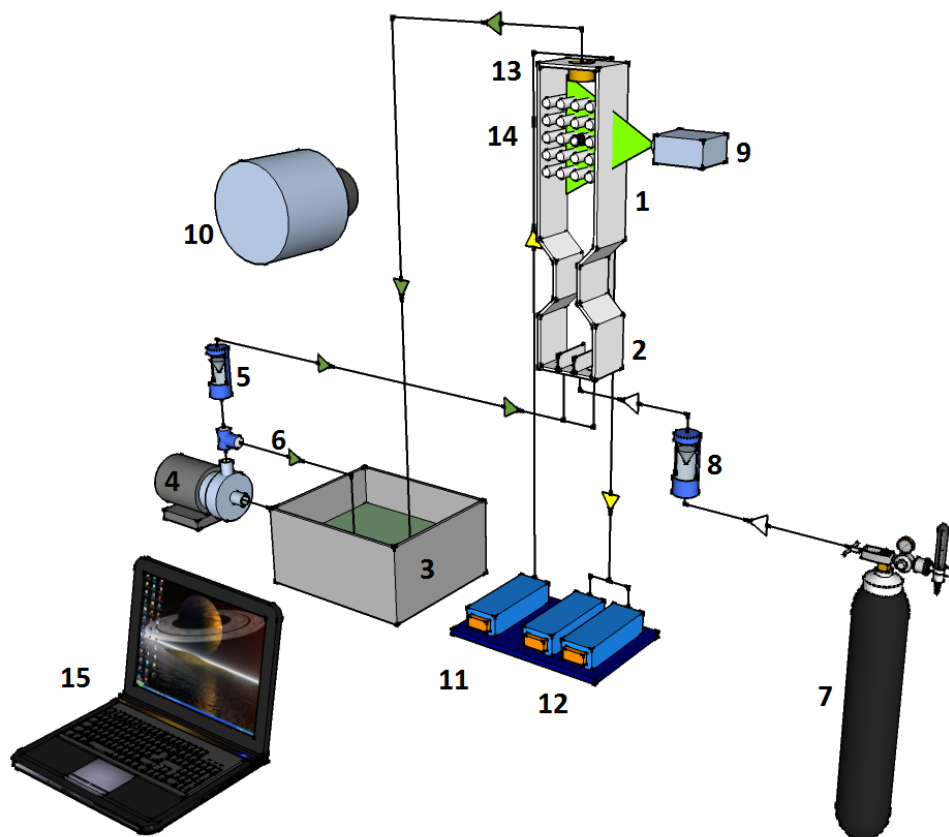
6. Stanowisko pomiarowe

Pomiary w warunkach laboratoryjnych przeprowadzono na stanowisku doświadczalnym, które można podzielić na trzy części:

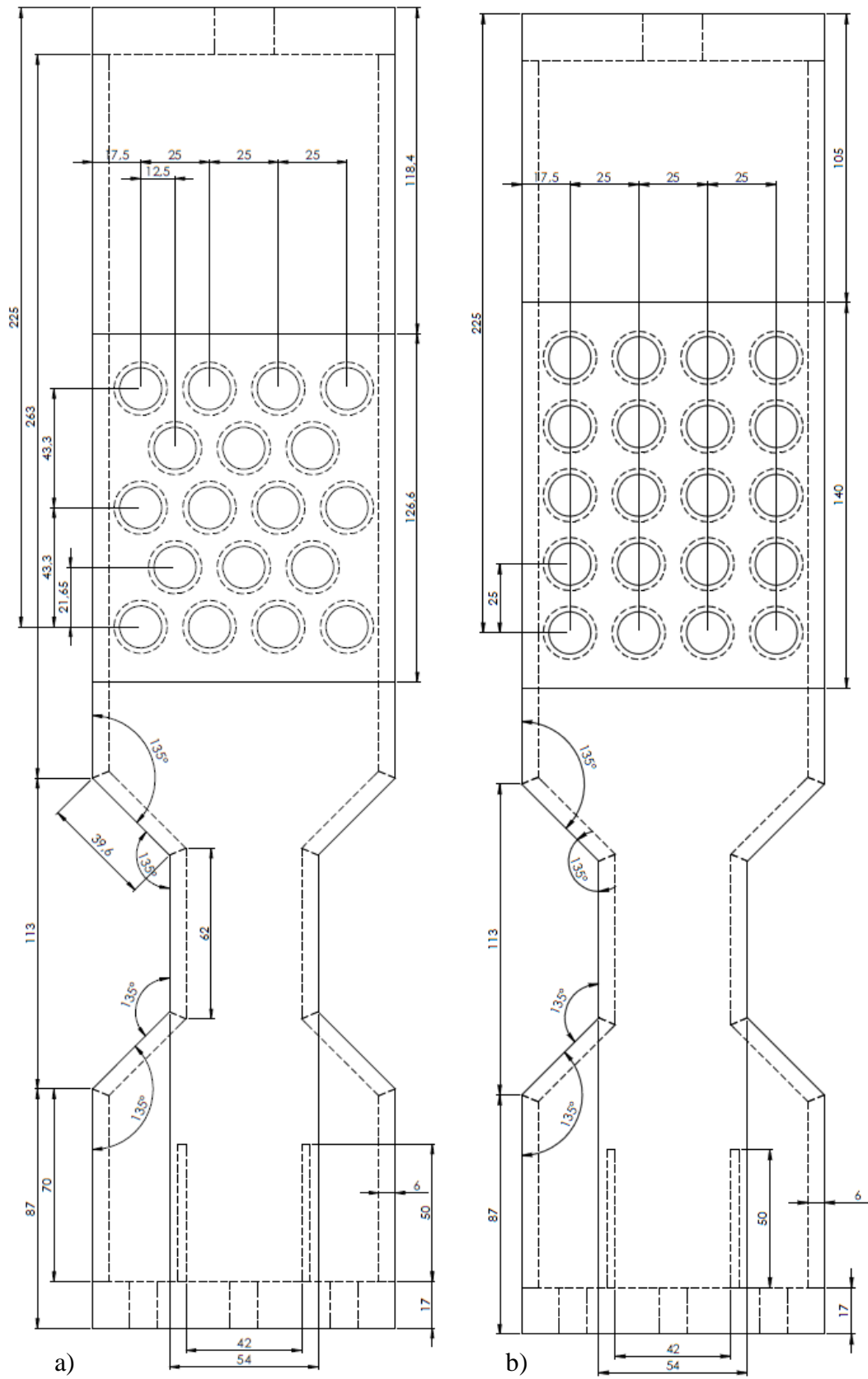
- obieg właściwy mieszaniny dwufazowej,
- tor optyczny do wizualizacji przepływu metodą PIV,
- układ elektryczny do pomiarów metodą elektrochemiczną.

6.1. Obieg właściwy

Głównym elementem stanowiska doświadczalnego na którym wykonano badania były dwa układy pęków rur wykonane z pleksiglasu. Pierwszy z nich z równoległym układem rurek, drugi z przestawnym. Średnica rurek wynosiła 15mm, a podziałka $t/d=1,66$. Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 6-1, szczegółowy rysunek wykonanych modeli przedstawia rysunek 6-2.



Rysunek 6-1. Schemat stanowiska pomiarowego



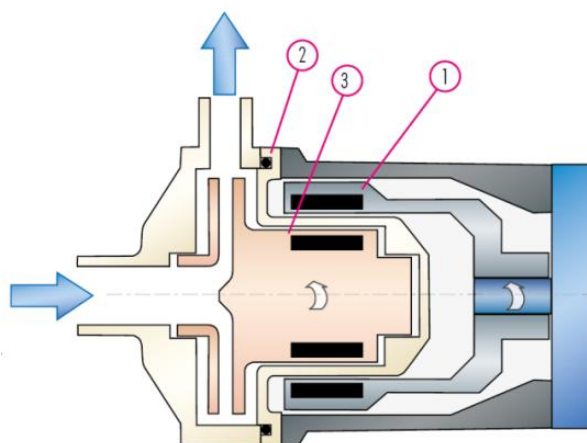
Rysunek 6-2. Rysunek modeli wykorzystanych w badaniach a) trójkątny przestawny 30°, b) kwadratowy szeregowy 90°

Modele skonstruowano w taki sposób aby możliwe było usunięcie każdej z rur z pęku i zastąpienie ich rurą z elektrodą. Rysunek 6-1 przedstawia schemat stanowiska badawczego. W dolnej części wymiennika znajdowała się komora mieszania faz (2). Faza ciekła była tłoczona z naczynia zbiorczego (3) pompą (4) do rotametru (5) lub bypassem (6) z powrotem do zbiornika. Przy braku regulacji obrotów pompy, regulacja strumienia cieczy odbywała się poprzez obieg zwrotny (bypass). z rotametru ciecz kierowana była do komory mieszania (2) i do głównego modelu (1). Równocześnie z butli (7) doprowadzono strumień azotu, którego strumień regulowano zaworem przed rotametrem (8), który po przepłynięciu przez cały układ był oddawany do atmosfery. Po przepłynięciu przez obszar badawczy mieszanina dwufazowa przepływała do naczynia zbiorczego (3), gdzie zachodziła separacja faz.

W związku z potrzebą zastosowania fazy ciekłej w postaci elektrolitu, zastosowano pompę o specjalnej konstrukcji. Była to pompa ze sprzęgłem magnetycznym w której przenoszenie napędu odbywa się za pomocą pola magnetycznego. w pompie tego typu moment obrotowy silnika elektrycznego jest przenoszony na wirnik pompy za pomocą sprzęgła magnetycznego. Bezuszczelnieniowa i hermetyczna budowa pozwoliły na bezpieczny transport niebezpiecznej substancji jaką był roztwór elektrolitu. Osłona izolacyjna pomiędzy magnesami napędu i magnesami wirnika, oddziela napęd od tłoczonego płynu. Należy zaznaczyć, że przeprowadzone zostały pomiary z których wynika że pole magnetyczne pompy nie wpływało w żadnym stopniu na wartości mierzonego napięcia i natężenia prądu. Schemat układu napędowego pompy przedstawia rysunek 6-3.

Ogólny widok stanowiska przedstawiono na rysunek 6-4.

1. Magnes napędzający połączony z silnikiem
2. Osłona oddzielająca część mokrą od otoczenia
3. Wirnik z napędzanymi magnesami



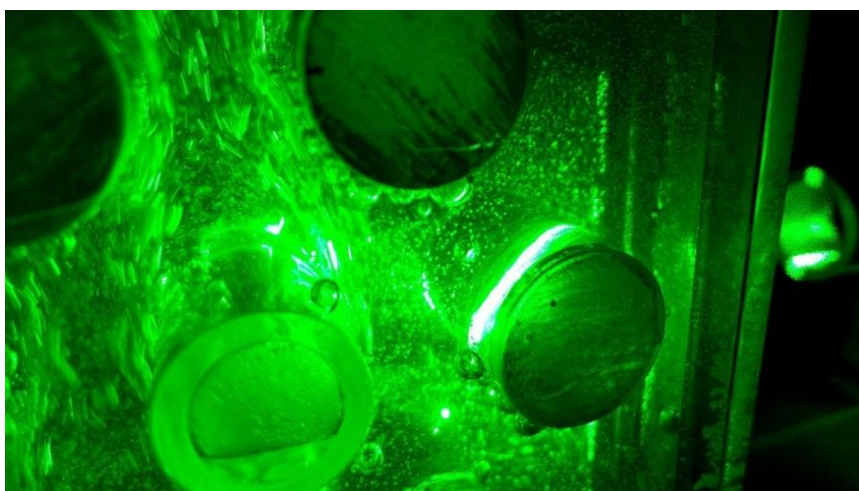
Rysunek 6-3. Schemat pompy magnetycznej



Rysunek 6-4. Widok stanowiska pomiarowego

6.2. Tor optyczny

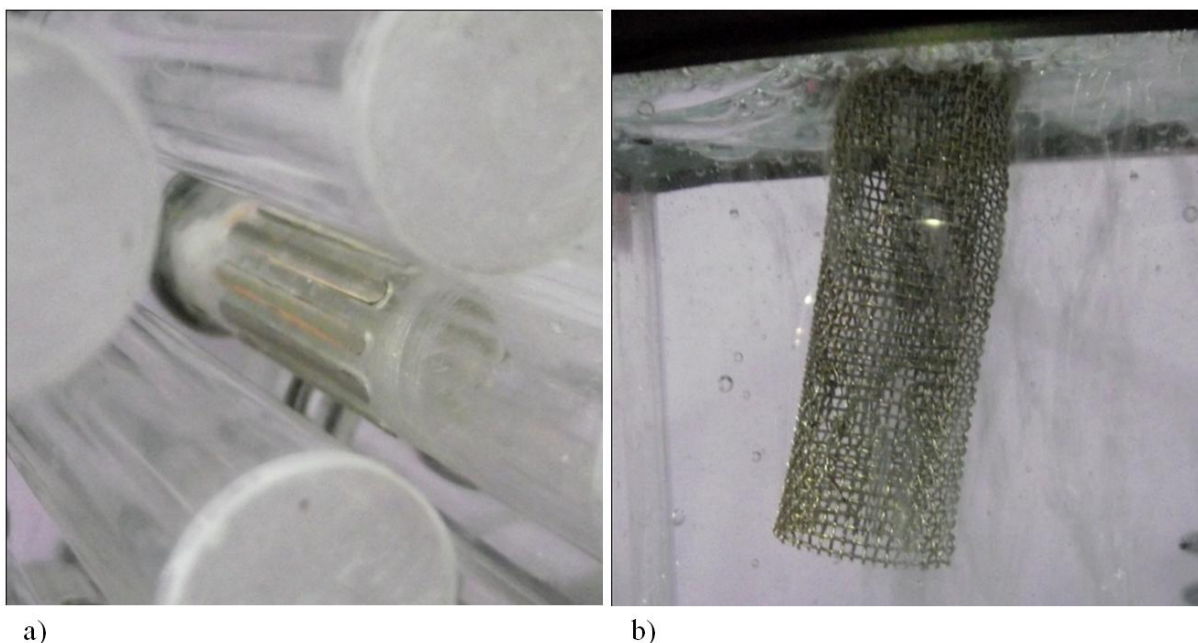
Do przepływającego płynu dodano poliamidowe cząstki znacznikowe o średnicy $20\mu\text{m}$. Obszar przepływu oświetlano laserem ciągłym o mocy 1 w oznaczonym na rysunku 6-1 numerem (9), wytwarzający wiązkę światła o długości fali $\lambda=532\text{ nm}$. Zastosowana technika oświetlania nosi nazwę noża świetlnego. Rysunek 6-5 przedstawia płaszczyznę światła laserowego przecinającą obszar badawczy. Oświetlony przepływ rejestrowano kamerą CMOS (10) (Rysunek 6-1) w rozdzielczości 1024×1024 pikseli. Obrazy przepływu zapisywano bezpośrednio w postaci map bitowych na stacji roboczej (15), ich rejestracja odbywała się z częstotliwością 462 Hz.



Rysunek 6-5. Pęk rur oświetlony płaszczyzną światła laserowego

6.3. Układ elektryczny

Do wykonania pomiaru natężenia prądu zastosowano układ dwunastu elektrod niklowych rozmieszczonych równomiernie na obwodzie rury, które przedstawia rysunek 6-6. Elektrody zanurzone w wodnym roztworze potasu, anoda oznaczona na rysunku 6-1 numerem (13), w postaci niklowanej siatki znajdowała się przy wypływie elektrolitu z wymiennika, a jako katodę (14) zastosowano niklowane blaszki miedziane usadzone na obwodzie rurki, którą można zastąpić dowolną rurkę w pęku. Zastosowany układ elektryczny pozwalał na dostarczenie określonego, skokowo rosnącego i stabilizowanego napięcia prądu stałego, płynącego przez roztwór elektrolitu pomiędzy katodą i anodą. Zastosowano układ trzech modułów analogowych. Zadaniem pierwszego z nich (11) było przyłożenie do układu prądu o założonym i rosnącym napięciu prądu, pozostałe dwa moduły (12) odpowiadały za odczytanie wartości natężenia prądu na każdej z blaszek z obwodu rurki. w celu odpowiedniego sterowania wszystkimi modułami napisano oprogramowanie z wykorzystaniem środowiska programistycznego LabVIEW. To umożliwiło określenie takich wartości jak minimalne i maksymalne wartości napięcia prądu, oraz jego skok. Wszystkie dane były archiwizowane natychmiast po pomiarze w postaci pliku tekstowego. Sterowanie i archiwizacja odbywały się za pomocą stacji pomiarowej (15).



Rysunek 6-6. Układ elektrod niklowych a) anoda, b) katoda

6.4. Właściwości układu oksydacyjno – redukcyjnego

Do badań metodą elektrochemiczną można wykorzystać kilka rodzajów elektrod i elektrolitów takich jak miedziowe elektrody w kwaśnym roztworze siarczanu miedziowego, elektrody ze srebra w elektrolicie z mieszaninami buforowymi, elektrody z innych metali w wodorotlenku sodu. Jednak z dotychczasowych badań i studiów literaturowych wynika że spośród dostępnych rozwiązań najbardziej odpowiednim do omawianych badań jest układ elektrod niklowych zanurzonych w roztworze mieszaniny heksacyjanożelazynu i heksacyjanożelazianu potasu, $K_3Fe(CN)_6$ i $K_4Fe(CN)_6$. Roztwór ten przygotowano na bazie wody destylowanej i zawierał następujące ilości substancji:

- 40g (1 mol) NaOH,
- 3,293g (0,01 mol) $K_3Fe(CN)_6$,
- 3,684g (0,01 mol) $K_4Fe(CN)_6$.

Roztwór przygotowano przed każdym pomiarem z uwagi na fakt że z upływem czasu zmieniają się jego właściwości. Dodatkowo przed pomiarem roztwór przechowywano w kanistrach z nieprzeźroczystego tworzywa a pomiary wykonywano ograniczając dostęp światła. Przy dostępie światła występuje szybki spadek koncentracji jonów reagujących w procesie [112].

Właściwości elektrolitu mające największe znaczenie w późniejszych obliczeniach współczynnika wnikania masy to gęstość, lepkość, współczynnik dyfuzji masy, oraz stężenie jonów w masie elektrolitu. Właściwości te zmieniają się wraz ze zmianą temperatury, należy więc pamiętać o utrzymaniu stałej temperatury w trakcie pomiarów. Na podstawie informacji zawartych w pracach [11] [49] [49] [126] do obliczeń wykorzystano następujące wartości:

- $\rho = 1040 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
- $\nu = 1,067 \times 10^{-6} \text{ [m}^2\text{/s]}$
- $D = 6,71 \times 10^{-10} \text{ [m}^2\text{/s]}$
- $C_b = 9,14 \times 10^{-3} \text{ [kmol/m}^3\text{]}$.

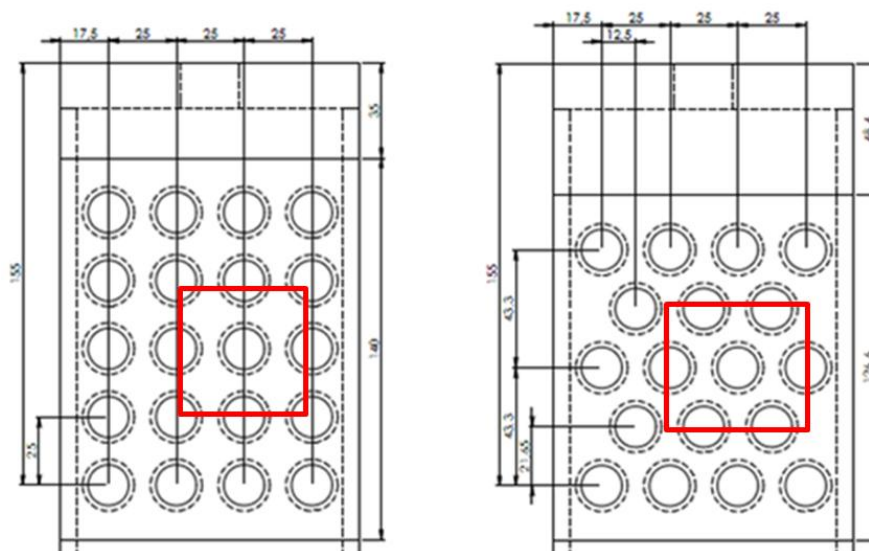
7. Koncepcja i metodyka badań i obliczeń.

Koncepcja badań opiera się na jednoczesnej wizualizacji przepływu wokół rurki oraz określeniu intensywności wymiany ciepła na powierzchni wybranej rurki. Zastosowanie optycznych metod pomiarowych umożliwia wizualizację i charakterystykę niejednorodności przepływu dwufazowego wokół rur. Zastosowanie metody elektrochemicznej pozwala na określenie intensywności wymiany ciepła na powierzchni rurek. **Połączenie tych dwóch metod badawczych jest próbą jednoznacznego określenia wpływu niejednorodności przepływu mieszaniny dwufazowej wokół rurki na lokalną wartość współczynnika wnikania ciepła na jej powierzchni.**

Koncepcja badań metodą elektrochemiczną opiera się na pomiarze wartości natężenia prądu płynącego przez katodę umieszczoną na powierzchni rurki przy wzroście napięcia prądu przyłożonego do układu. Zmierzone wartości posłużyły do wyznaczenia krzywych polaryzacyjnych z wykorzystaniem których określono wartości prądu granicznego plateau wykorzystywane w wyznaczeniu współczynnika wnikania masy. Ostatnim krokiem było wykorzystanie analogii wymiany masy i ciepła i wyznaczenie wartości współczynnika wnikania ciepła, co pozwala na określenie intensywności wymiany ciepła na powierzchni rurek.

Koncepcja badań metodą DPIV opierała się na optycznej analizie wznoszącego przepływu mieszaniny dwufazowej gaz-ciecz poprzecznie do pęków rur, wynikiem czego uzyskano informacje o pracy wymiennika ciepła. Zastosowanie optycznych metod analizy obrazu pozwoliło określić nierównomierność rozkładu pól prędkości wokół pęków rur. Prowadzone badania polegały na rejestracji obrazów przepływu z wysoką częstotliwością, które następnie poddano cyfrowemu przetwarzaniu i analizie obrazu. Ostatnim etapem była analiza, ocena i interpretacja uzyskanych wyników. Celem było uzyskanie informacji o zmianach charakterystyki przepływu i wymiany ciepła przy zmianach strumieni faz, oraz porównanie wyników dla dwóch układów pęku rur – przestawnego i szeregowego.

Jednoczesną rejestrację obrazów i pomiar wartości napięcia i natężenia prądu w układzie przeprowadzono dla obszaru wokół pojedynczych rur umieszczonych w 3 rzędzie w pęku, co pokazano na rysunku 7-1.



Rysunek 7-1. Obszary rejestracji obrazów

Katoda wprowadzona w obszar przepływu składała się z 12 osobnych punktów pomiarowych umieszczonych na powierzchni rurki co 30 stopni. Dzięki temu można było wykonać pomiar jednocześnie dla całego obwodu rurki bez konieczności jej obracania. Podczas pojedynczego pomiaru dokonywano rejestracji napięcia i natężenia w zakresie od 0 do 2 V i skoku napięcia o 0,05V, co odbywało się dla 12 punktów pomiarowych, co w sumie daje 480 punktów pomiarowych. Wykonano po 9 serii pomiarowych dla dwóch układów pęków rur, dla każdej z serii wykonano po 3 pomiary. Łącznie na potrzeby niniejszej pracy uzyskano 12960 danych pomiarowych natężenia prądu, które wykorzystano do wykonania krzywych polaryzacyjnych i wyznaczenia prądu plateau. w tym samym czasie rejestrowano obrazy przepływu. Przed rejestracją, obszar przepływu oświetlano płaszczyzną światła laserowego oraz ustawiano obiektyw tak, aby jego płaszczyzna ostrości pokrywała się z płaszczyzną światła lasera. w ten sposób zarejestrowano tylko ruch znaczników i pęcherzy przepływających przez nóż świetlny. Następnie po ustaleniu warunków przepływu, czyli po regulacji strumieni obydwu faz na rotametrach przystępowano do rejestracji obrazu. Dla każdej serii pomiarowej zapisywano 50 pojedynczych obrazów. Obrazy w postaci monochromatycznych map bitowych o rozdzielczości 1024×1024 pikseli rejestrowano z częstotliwością 462Hz, więc rejestracja jednej serii pomiarowej trwała 0,1s. Dla potrzeb korekty strumieni faz mierzono temperaturę i nadciśnienie przed rotametrem.

Badania wykonano dla trzech różnych strumieni przepływu cieczy i gazu dla dwóch układów rur – równoległego i przestawnego, oznaczenia serii pomiarowych i odpowiadające im wartości strumieni przepływu przedstawia tabela 7-1.

Tabela 7-1. Serie pomiarowe.

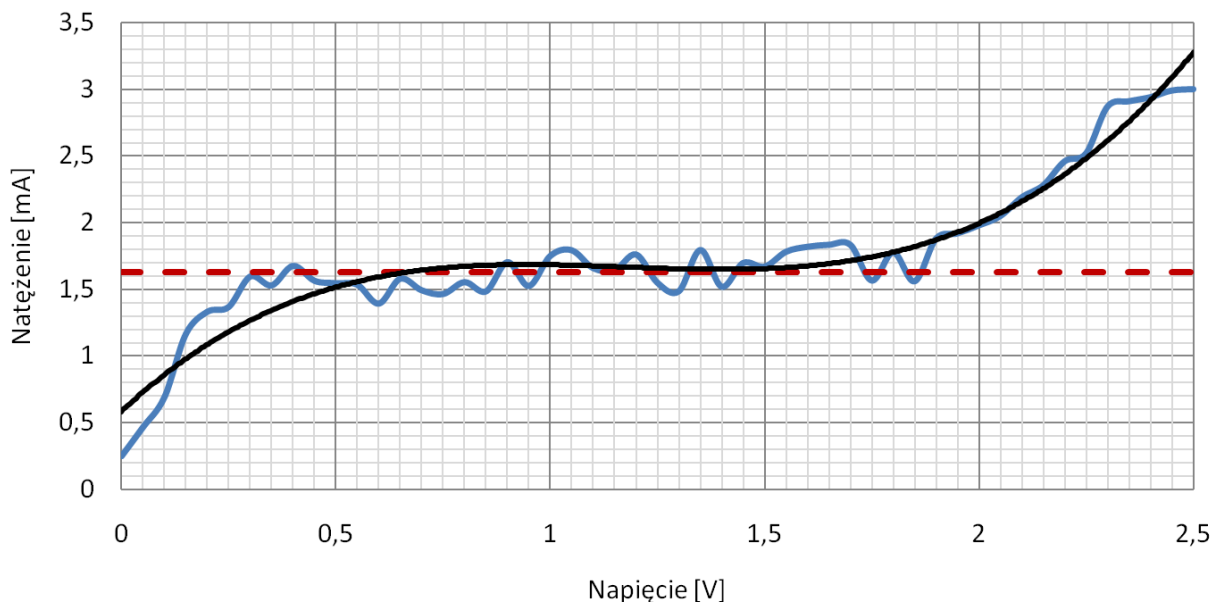
Nazwa serii	Układ rur	Strumień cieczy	Strumień gazu	Nazwa serii	Układ rur	Strumień cieczy	Strumień gazu
L0800G10L	szeregowy	800dm ³ /h	10dm ³ /h	L0800G10S	przestawny	800dm ³ /h	10dm ³ /h
L0800G30L		800dm ³ /h	30dm ³ /h	L0800G30S		800dm ³ /h	30dm ³ /h
L0800G60L		800dm ³ /h	60dm ³ /h	L0800G60S		800dm ³ /h	60dm ³ /h
L1000G10L		1000dm ³ /h	10dm ³ /h	L1000G10S		1000dm ³ /h	10dm ³ /h
L1000G30L		1000dm ³ /h	30dm ³ /h	L1000G30S		1000dm ³ /h	30dm ³ /h
L1000G60L		1000dm ³ /h	60dm ³ /h	L1000G60S		1000dm ³ /h	60dm ³ /h
L1200G10L		1200dm ³ /h	10dm ³ /h	L1200G10S		1200dm ³ /h	10dm ³ /h
L1200G30L		1200dm ³ /h	30dm ³ /h	L1200G30S		1200dm ³ /h	30dm ³ /h
L1200G60L		1200dm ³ /h	60dm ³ /h	L1200G60S		1200dm ³ /h	60dm ³ /h

Nazwy serii:

L
XXXX
G
YY
L/S

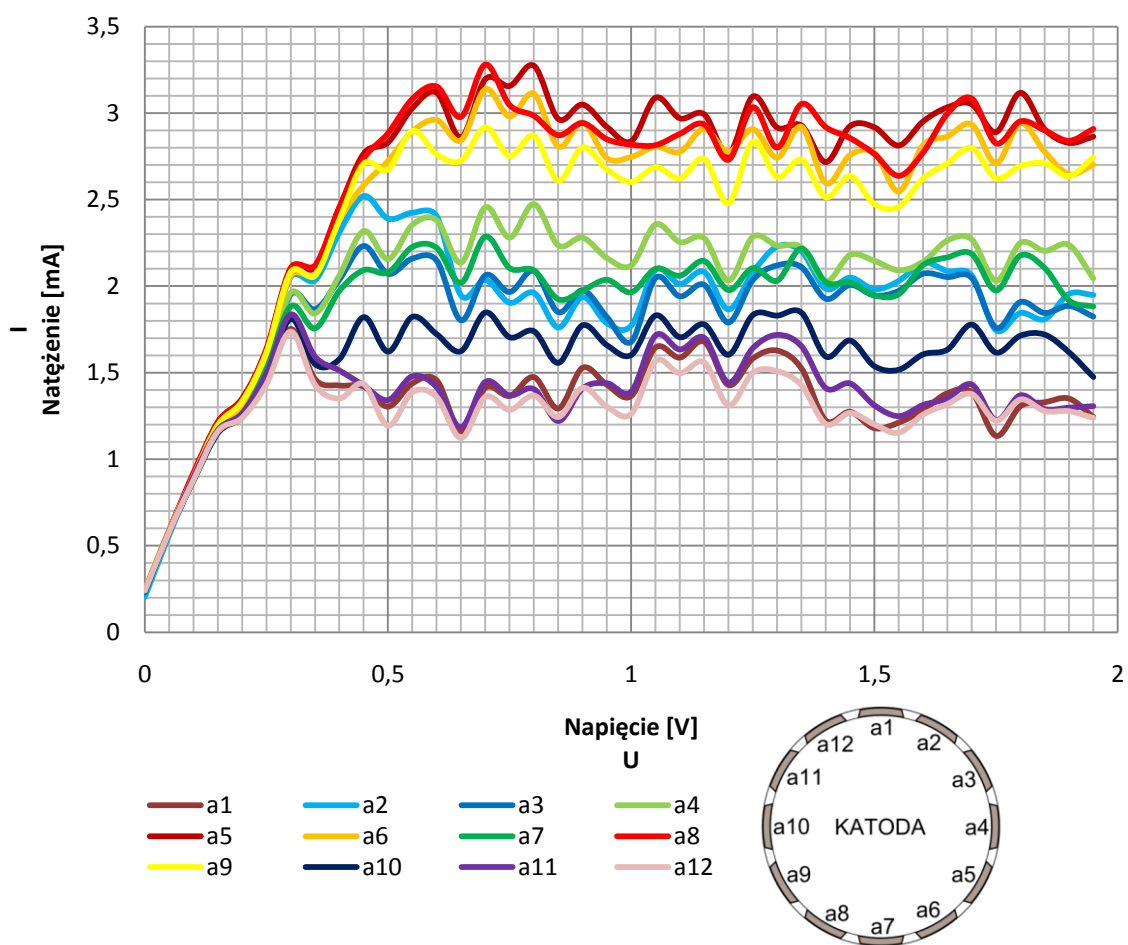
Ciecz
strumień cieczy
gaz
strumień gazu
układ (L – szeregowy, S – przestawny)

Przykład uzyskanej krzywej polaryzacyjnej przedstawia rysunek 7-2. Nie uzyskano idealnie gładkiego odcinka prądu plateau, wartości wahały się w granicach 0,2mA. Można to tłumaczyć wysoce burzliwym charakterem przepływu dwufazowego. Wzrost prędkości przepływu wpływa na rozkład krzywej polaryzacyjnej.



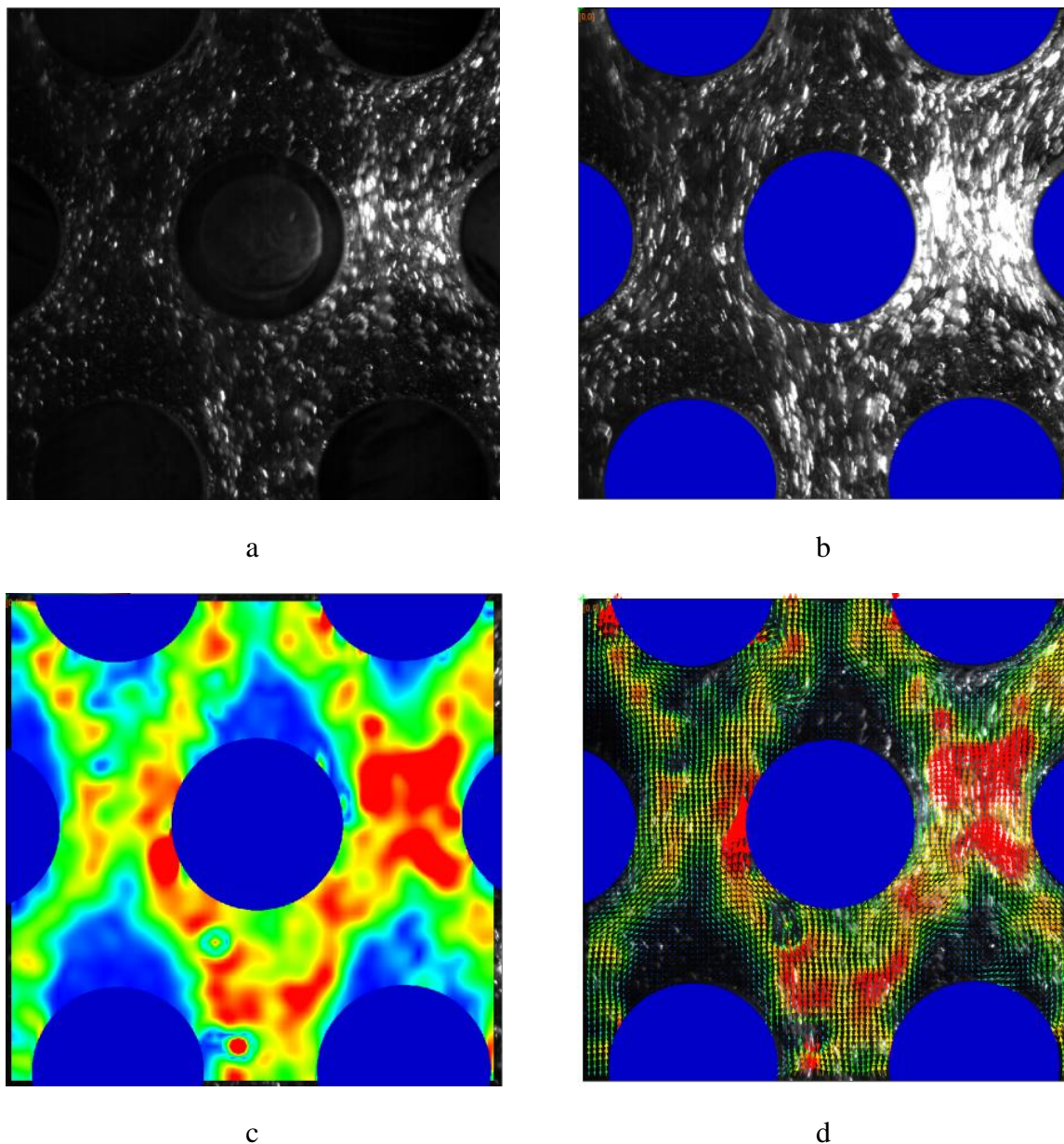
Rysunek 7-2. Przykładowa krzywa polaryzacyjna dla jednego z pomiarów

Wzrost liczby Reynoldsa powoduje zmniejszenie średniej grubości dyfuzyjnej warstwy Nernsta, co powoduje wzrost współczynnika wymiany masy oraz wzrost natężenia prądu granicznego [11]. Duża ilość przepływających pęcherzy gazu powoduje powstawanie nierównomierności rozkładu pola prędkości przepływu wokół rurki, czym można tłumaczyć zmienny charakter krzywej plateau. Niemniej jednak można zauważyć pewną prawidłowość. Przy zwiększaniu wartości napięcia do około 0,4V, wartości natężenia wzrastały, po czym po przekroczeniu tej wartości oscylowały według jednej wartości natężenia o osiągnięcia około 1,65V. Powyżej tej wartości ponownie występował wzrost wartości natężenia. Przyjęto więc średnią wartość natężenia z zakresu napięcia od 0,4V do 1,65V jako napięcie plateau, tą wartość wykorzystano w dalszych obliczeniach. Przykładanie do układu wartości napięcia powyżej 2V może wpływać negatywnie na stan elektrody i powodować jej niszczenie. Rysunek. 7-3 przedstawia zestawienie dla funkcji natężenia względem napięcia dla pojedynczego pomiaru dla 12 punktów pomiarowych z jednej rurki.



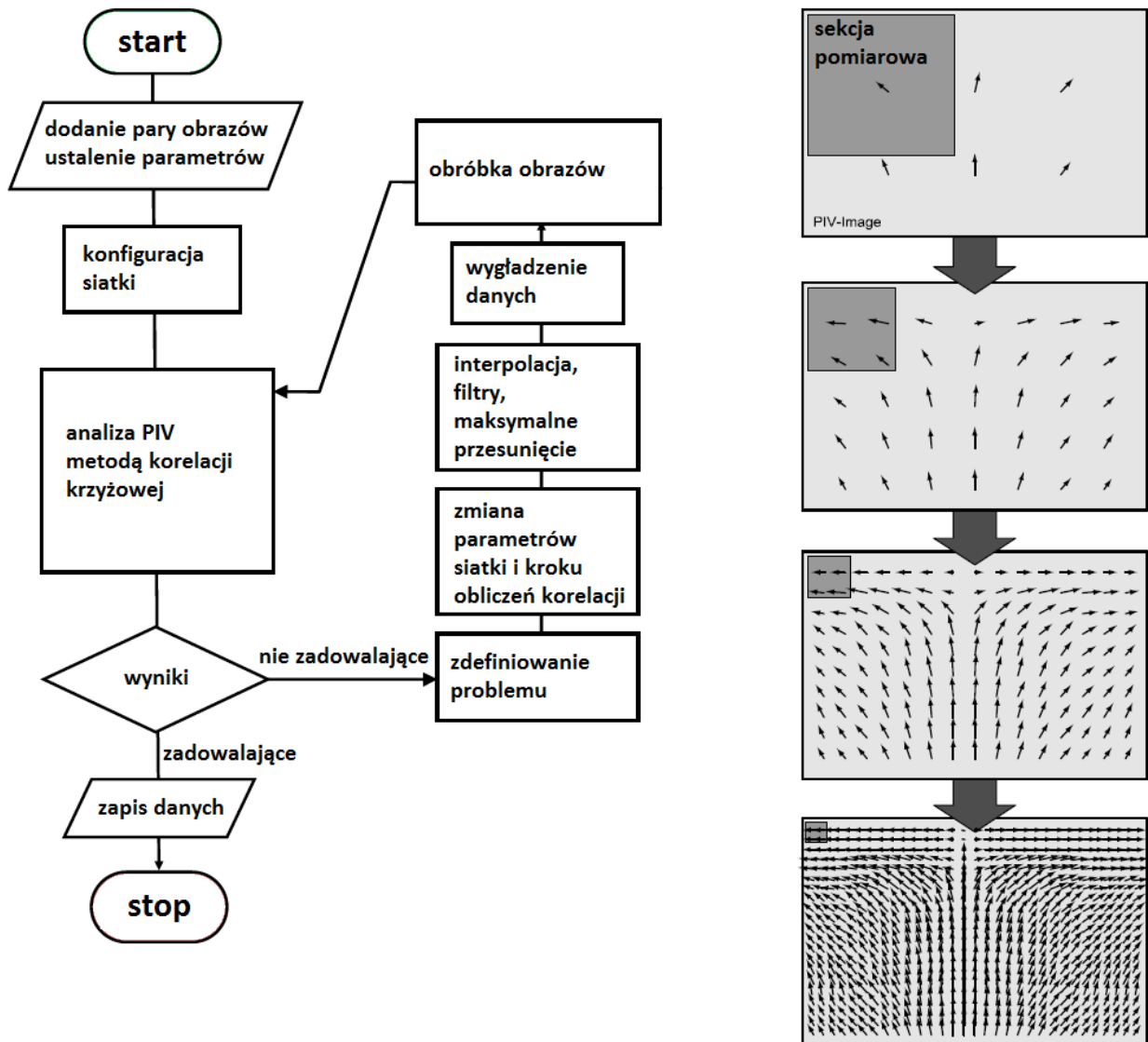
Rysunek. 7-3. Przykładowe zestawienie zmierzonych wartości natężenia prądu przy zmianie jego napięcia dla jednego z pomiarów

Równocześnie z pomiarem wartości napięcia i natężenia prądu w układzie, rejestrowano obrazy przepływu z zastosowaniem kamery. Uzyskane mapy bitowe poddano wstępnej obróbce poprzez zwiększenie kontrastu, ostrości, oraz dodanie maski w miejsca rurek gdzie nie należy przeprowadzać analizy. Obraz uzyskany z pomiarów, obraz po obróbce oraz pole prędkości przedstawia rysunek 7-4. Tak przygotowane serie danych poddano analizie DPIV. Do tego celu wykorzystano oprogramowanie PIVview2C firmy PIVTEC dedykowane do tego rodzaju badań.



Rysunek 7-4. Przykłady obrazów i pól prędkości a) obraz przepływu, b) obraz z nałożoną maską bitową, c) pole prędkości, d) wektorowe pole prędkości

Przeprowadzono próby tworzenia pól prędkości dla różnych konfiguracji programu, najlepsze wyniki otrzymano z wykorzystaniem funkcji korelacji krzyżowej, przy rozmiarze sekcji 24×24 pikseli. Rysunek 7-5 przedstawia schemat obrazujący drogę doboru poprawnej konfiguracji oprogramowania DPIV.



Rysunek 7-5. Schemat blokowy drogi konfiguracji oprogramowania DPIV

8. Opracowanie wyników badań – metoda elektrochemiczna.

Głównym celem badań była ocena nierównomierności intensywności wymiany ciepła na powierzchni rurki umieszczonej w pęku rur. w tym celu przedstawiono rozkład liczby Nusselta wyliczony dla każdej z katod umieszczonych w gniazdach na zewnętrznej powierzchni rurek. Wartości te obliczono wykorzystując analogię Chiltona-Colburna [20] pomiędzy procesami wymiany ciepła i masy, oraz tok postępowania przedstawiony w pracach [11] [107]. w celu wyznaczenia wartości współczynnika przejmowania ciepła i liczby Nusselta należy najpierw wyznaczyć współczynnik wymiany masy na podstawie równania:

$$h_D = \frac{I_p}{nFAC_b} \quad (8-1)$$

Wielkość natężenia prądu plateau I_p wyznaczono na podstawie pomiarów przebiegu zmienności natężenia w funkcji napięcia prądu płynącego pomiędzy anodą i katodą. Elektronowość reakcji elektrodowej, czyli liczba elektronów wchodzących w reakcję z jonem lub cząstką $n=1$. Wielkość powierzchni katody określono na podstawie pomiarów i wynosi ona $A=9,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Stężenie jonów roboczych w elektrolicie wyznacza się poprzez miareczkowanie, do obliczeń przyjęto $C_b=0,00914[\text{kmol/m}^3]$. Mając wyznaczony współczynnik wymiany masy można wyliczyć wartości liczby Stanton dla wymiany masy z równania:

$$St_M = \frac{h_D}{w} \quad (8-2)$$

Do obliczeń wykorzystano prędkość pozorną mieszaniny elektrolitu i azotu liczoną w najmniejszym przekroju w pęku rur. Następnie z wykorzystaniem analogii wymiany masy i ciepła Chiltona-Colburna przeliczono wartość liczby Stanton dla wymiany masy na wartości liczby Stanton dla wymiany ciepła stosując zależność:

$$St_H = St_M \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \quad (8-3)$$

Wartości liczby Schmidta wyznaczono z zależności:

$$Sc = \frac{v}{D} \quad (8-4)$$

Wartości liczby Prandtla wyznaczone z równania:

$$Pr = \frac{c_p \eta}{\lambda} \quad (8-5)$$

Do wyznaczenia liczby Reynoldsa wykorzystano równanie:

$$Re = \frac{wl}{\nu} \quad (8-6)$$

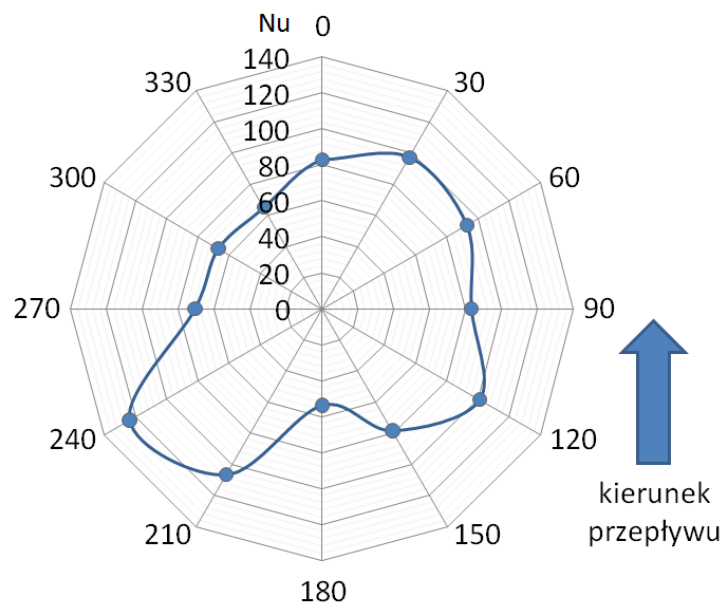
Tak uzyskane wartości wykorzystano do wyznaczenia liczby Nusselta z równania:

$$Nu = St_H Re Pr \quad (8-7)$$

Obliczono również wartości konwekcyjnego współczynnika przejmowania ciepła uzyskanego z zależności:

$$h_H = \rho c_p w \cdot St_H \quad (8-8)$$

Wyniki można przedstawić za pomocą wykresów radarowych których przykłady przedstawia rysunek 8-1. Dla uproszczenia w dalszej części pracy prezentowano wyłącznie funkcję interpolacyjną, pamiętając, że dla zaznaczonych wartości kąta są to także wartości zmierzone.



Rysunek 8-1. Przykład wyników badań metodą elektrochemiczną. Wykres rozkładu liczby Nusselta interpolowany funkcją sklejaną

9. Wyznaczenie współczynnika wnikania ciepła dla pęku rur metodą VDI

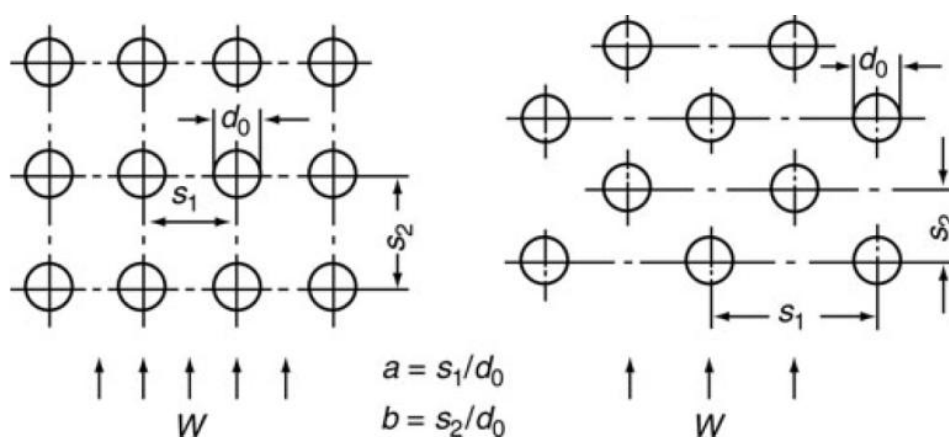
W celu wstępnej oceny uzyskanych wyników badań postanowiono porównać je z wynikami obliczonymi na podstawie dostępnych w literaturze [121] korelacji dla przepływu jednofazowego poprzecznie do pęku rur. Średnia wartość liczby Nusselta dla pęku rur o ilości rzędów $n_R < 10$ jest inna niż w przypadku pęku rur z ilością rzędów $n_R > 10$. Przepływ i turbulencja dla pierwszych rzędów rur nie są jeszcze w pełni rozwinięte. Wartość liczby Nusselta mierzona na powierzchni rury w pęku jest zależna od ilości poprzedzających ją rur. Wartość ta wzrasta od pierwszego rzędu, do około piątego, po czym pozostaje stała. W przypadku kiedy należy wyznaczyć liczbę Nusselta dla pęku rur o ilości większej niż 10, wpływ pierwszych rzędów jest pomijany, liczba Nusselta dla rury w pęku $Nu_{0,bundle}$ jest funkcją liczby Nusselta w pojedynczym rzędzie $Nu_{l,0}$, można więc zastosować równanie:

$$Nu_{0,bundle} = f_A Nu_{l,0} \quad (9-1)$$

W przypadku kiedy badana rura leży w jednym z pierwszych dziesięciu rzędów rur, lub cały pęk ma mniej niż dziesięć rzędów, średnia wartość liczby Nusselta przy przepływie poprzecznym do pęku rur może zostać wyznaczona z równania:

$$Nu_{0,bundle} = \frac{1+(n-1)f_A}{n} Nu_{l,0} \quad (9-2)$$

Wpływ strefy stagnacji ψ i wartość współczynnika układu rur f_A zależy od poprzecznej $a = s_1/d_o$ i wzdłużnej $b = s_2/d_o$ podziałki rur. Wyznaczenie wartości a i b dla różnych układów rur przedstawia rysunek 9-1.



Rysunek 9-1. Poprzeczna i wzdłużna podziałka rur w pęku

Udział stref stagnacji jest określony przez równanie:

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4a}, \text{ dla } b \geq 1 \quad (9-3)$$

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4ab}, \text{ dla } b < 1 \quad (9-4)$$

Według [37] wartość liczby Nusselta dla przepływu poprzecznego do pojedynczej rury można wyznaczyć z równania:

$$Nu_{l,0} = 0,3 + \sqrt{Nu_l^2 + Nu_t^2} \quad (9-5)$$

Gdzie

$$Nu_l = 0,664\sqrt{Re^3 Pr} \quad (9-6)$$

$$Nu_t = \frac{0,037 Re^{0,8} Pr}{1 + 2,443 Re^{-0,1} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (9-7)$$

W związku z faktem że pomiary przepływu na potrzeby niniejszej pracy wykonano dla niskich wartości prędkości przepływu, a co za tym idzie niskich wartości Re które nie wykraczały poza wartości przepływu laminarnego, do dalszych obliczeń przyjęto, że $Nu_t=0$, a $Nu_{l,0} = Nu_l$.

Liczby Reynoldsa i Prandtla wyznaczono z zależności:

$$Re = \frac{wl}{\nu}, 10 < Re_l < 10^6 \quad (9-8)$$

$$Pr = \frac{c_p \eta}{\lambda}, 0,6 < Pr < 10^3 \quad (9-9)$$

Długość charakterystyczną do obliczenia liczby Reynoldsa wyznaczono z równania:

$$l = \frac{\pi}{2} d_0 \quad (9-10)$$

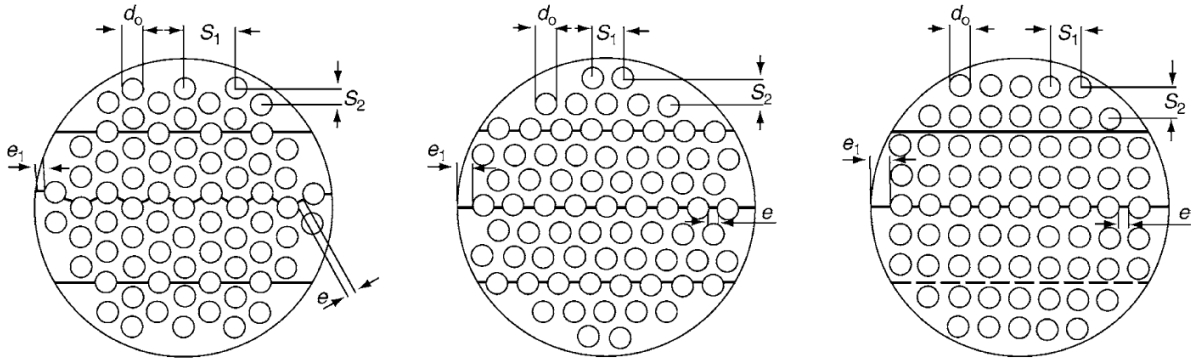
Prędkość wyznaczono na podstawie geometrii modelu i wartości strumieni obydwu faz.

Przyjmując że

$$a = \frac{s_1}{d_0} = \frac{25}{15} = 1,67 \quad (9-11)$$

$$b_{szer} = \frac{s_2}{d_0} = \frac{25}{15} = 1,67 \quad (9-12)$$

$$b_{prze} = \frac{s_2}{d_0} = \frac{21,65}{15} = 1,44 \quad (9-13)$$



$$\text{Dla } b < \frac{1}{2}\sqrt{2a+1}$$

$$\text{Dla } b \geq \frac{1}{2}\sqrt{2a+1}$$

$$e = S_1 - d_0$$

$$e = \sqrt{\left(\frac{S_1}{2}\right)^2 + S_2^2} - d_0$$

$$e = S_1 - d_0$$

Rysunek 9-2 Ilustracja najkrótszych połączeń wg [120]

Stosując się do powyższych założeń wyznaczono najmniejsze pole przekroju w przestrzeni międzyrurowej badanego modelu, dzięki czemu przy znajomości strumieni przepływu obydwu faz możliwe było wyznaczenie prędkości pozornej przepływu mieszaniny dwufazowej z równania:

$$w = \frac{\dot{V}}{F_{min}} \quad (9-14)$$

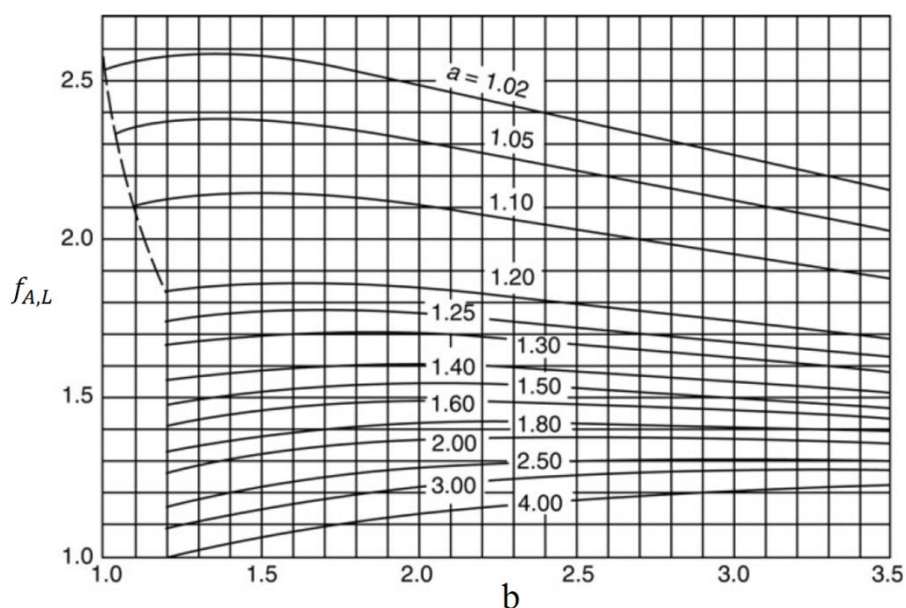
Współczynnik f_A dla równoległego układu rur jest określony przez równanie

$$f_{A,L} = 1 + \frac{0,7\left(\frac{b}{a}-0,3\right)}{\psi^{1,5}\left(\frac{b}{a}+0,7\right)^2} \quad (9-15)$$

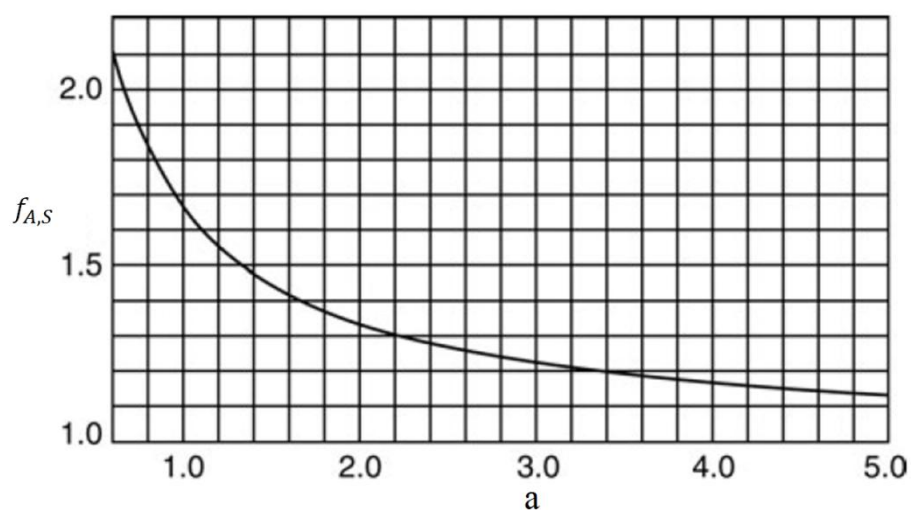
Natomiast dla układu przestawnego

$$f_{A,S} = 1 + \frac{2}{3b} \quad (9-16)$$

Rysunek 9-3 przedstawia $f_{A,L}$ jako funkcję podziałek poprzecznej a i wzdłużnej b , natomiast Rysunek 9-4 przedstawia wartość $f_{A,S}$ jako funkcję podziałki wzdłużnej b .



Rysunek 9-3. współczynnik $f_{A,L}$ dla równoległego układu rur w funkcji wzdłużnej i poprzecznej podziałki [120]



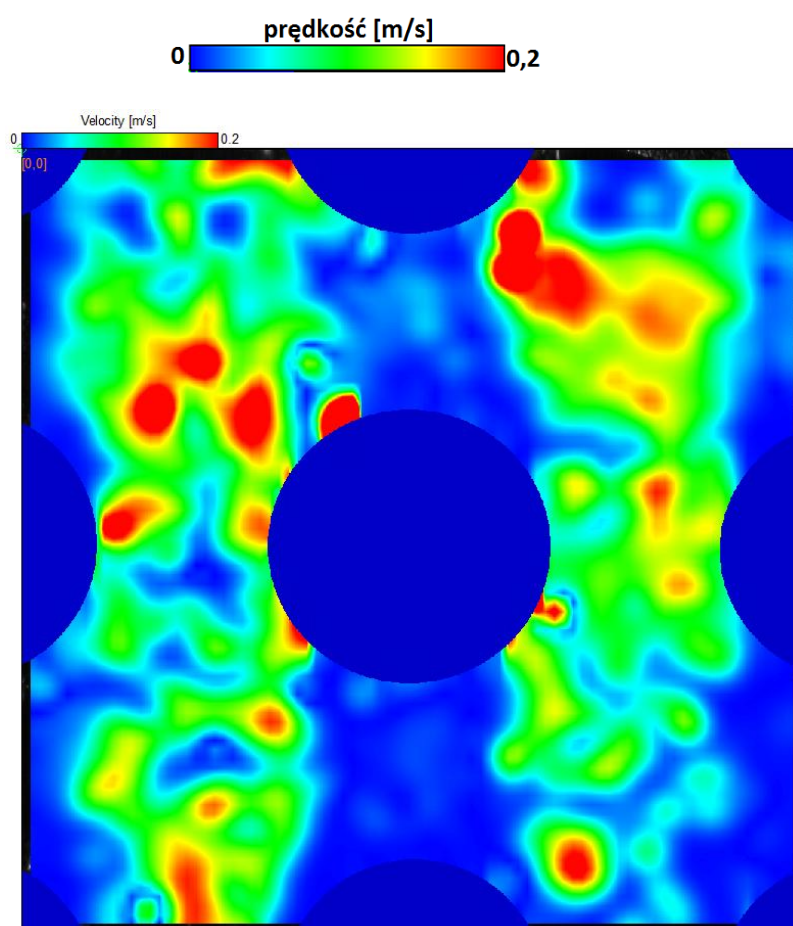
Rysunek 9-4. współczynnik $f_{A,S}$ dla przestawnego układu rur w funkcji podziałki wzdłużnej [120]

W dalszej części pracy, po przetworzeniu wszystkich wyników badań, taka analiza zostanie przeprowadzona.

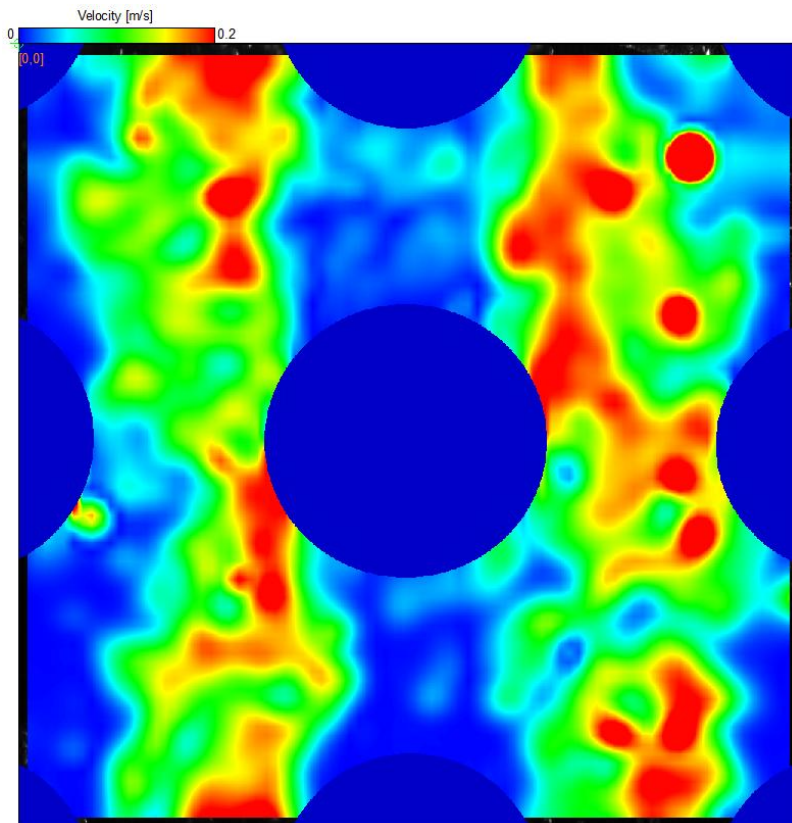
10. Wyniki badań – wykonanych metodą DPIV.

Analiza wykresów dostarczyła informacji na temat nierównomierności opływu mieszaniny dwufazowej wokół pęku rur w zależności od układu i wartości strumieni poszczególnych faz. Wykresy pól prędkości umożliwiają identyfikację obszarów stagnacji występujących za rurami oraz określenie ich wielkości. Na podstawie analizy przesunięcia znaczników, oraz pęcherzy gazu można ocenić zmiany kierunku i prędkości przepływu. Można więc z ich wykorzystaniem scharakteryzować strukturę przepływu dwufazowego w przestrzeni międzyrurowej. Możliwa jest ocena wpływu układu i prędkości przepływu w przestrzeni międzyrurowej na jednorodność pola prędkości oraz oceny nierównomierności opływu pęku rur przez mieszaninę dwufazową.

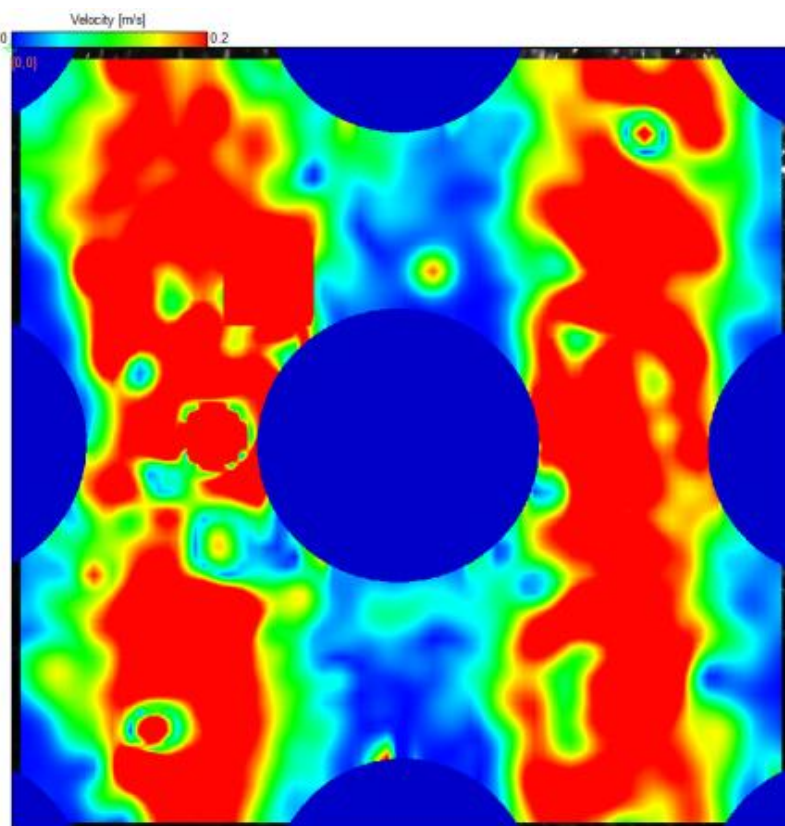
Na rysunkach od 10-1 do 10-9 przedstawiono rozkłady pola prędkości dla szeregowego układu rur.



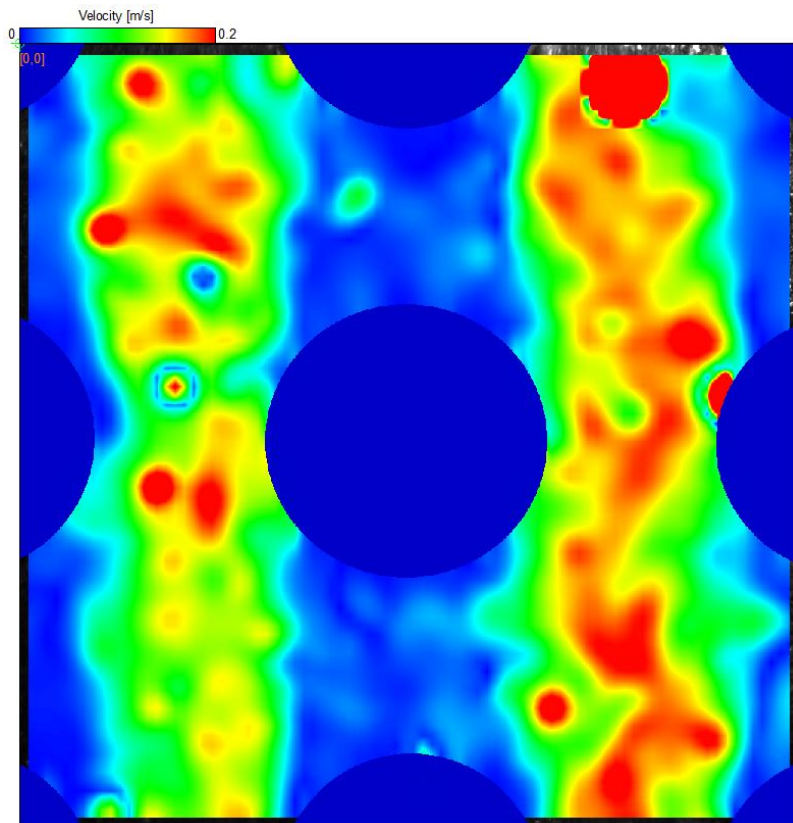
Rysunek 10-1. Pole prędkości; L0800G10L



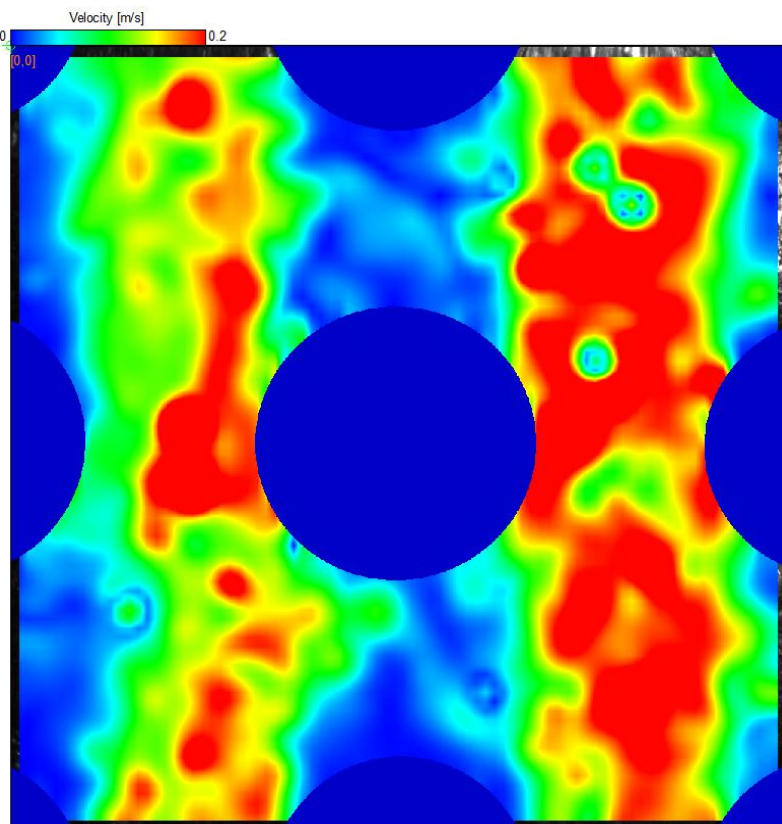
Rysunek 10-2. Pole prędkości; L0800G30L



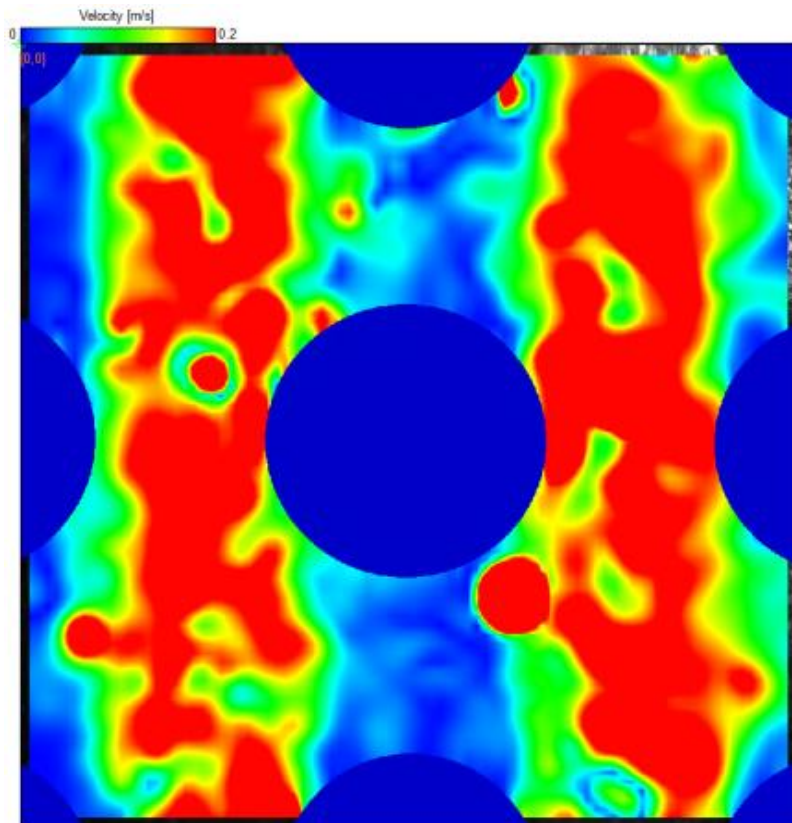
Rysunek 10-3. Pole prędkości; L0800G60L



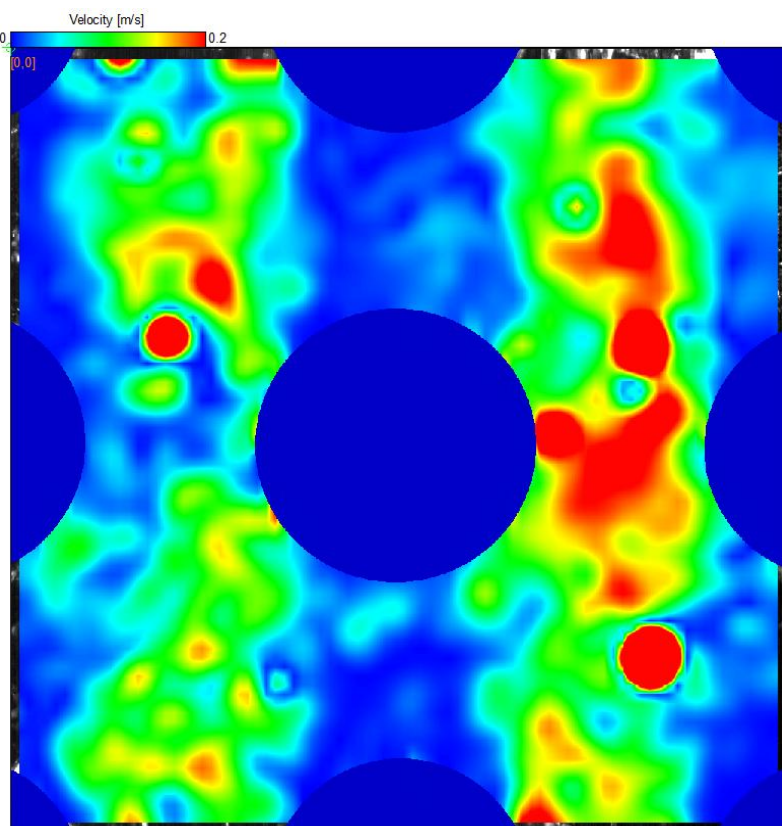
Rysunek 10-4. Pole prędkości; L1000G10L



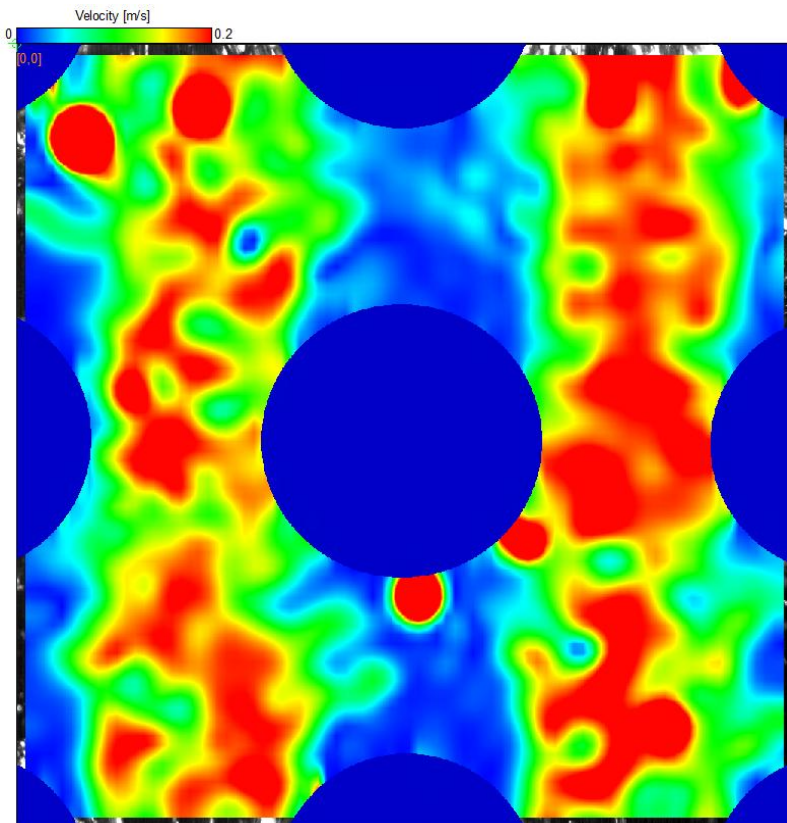
Rysunek 10-5. Pole prędkości; L1000G30L



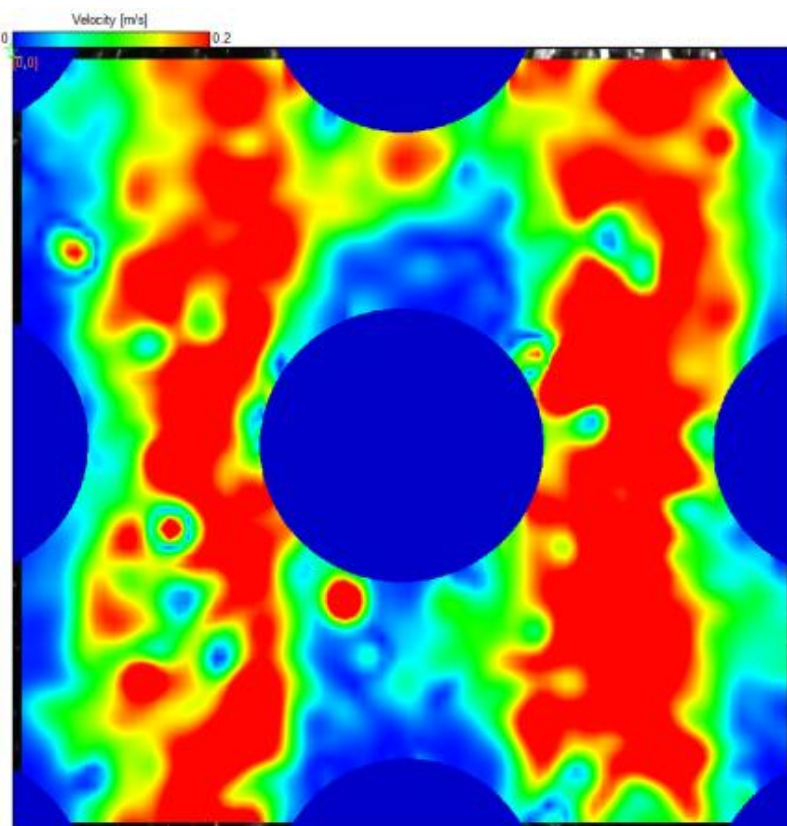
Rysunek 10-6. Pole prędkości; L1000G60L



Rysunek 10-7. Pole prędkości; L1200G10L



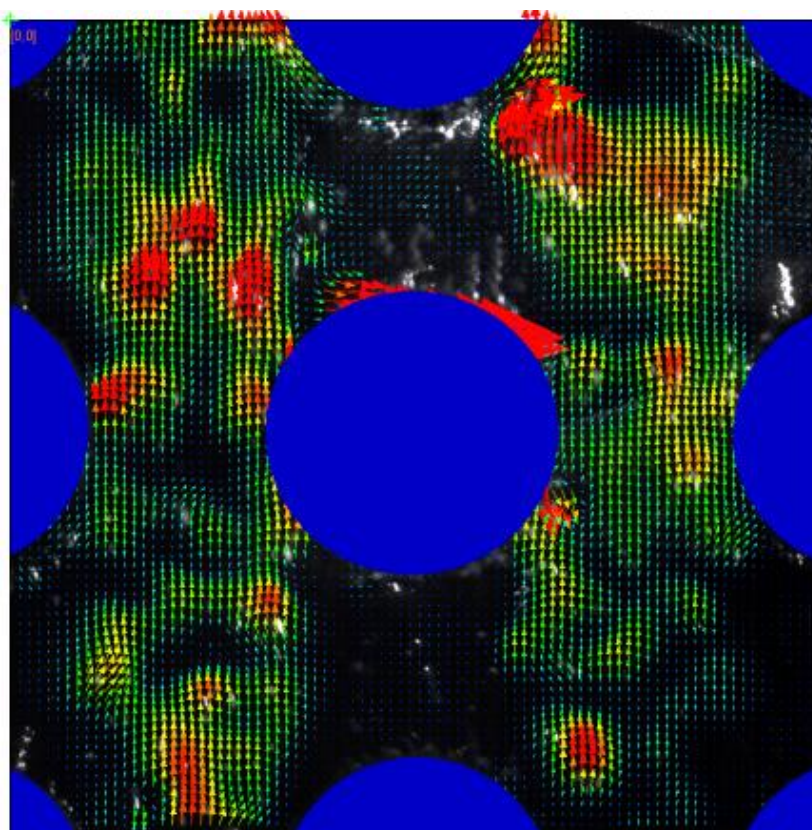
Rysunek 10-8. Pole prędkości; L1200G30L



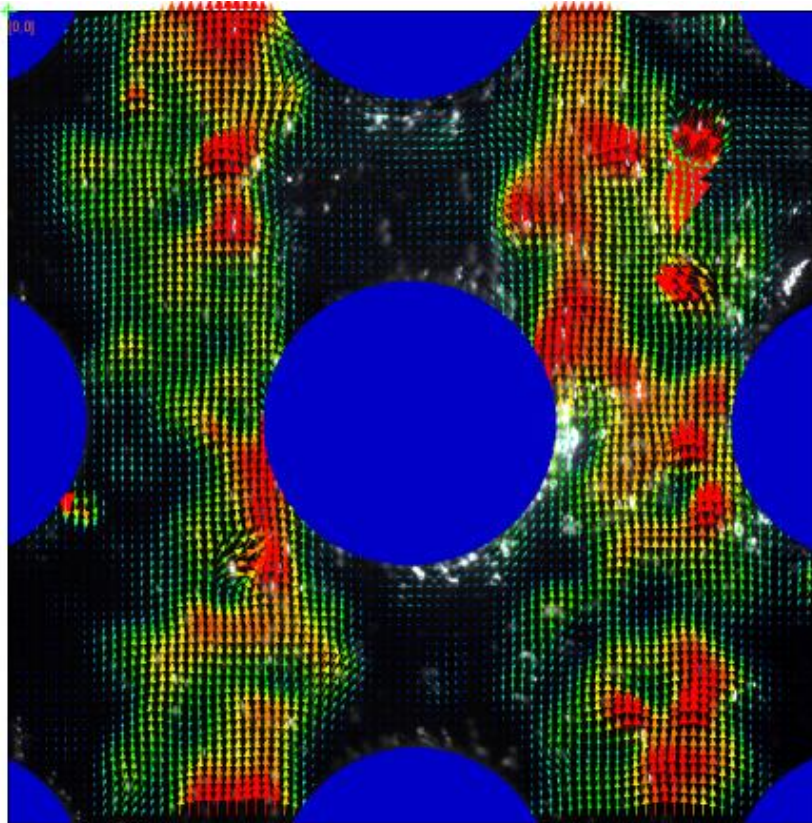
Rysunek 10-9. Pole prędkości; L1200G60L

Pola prędkości dla przepływu wokół szeregowego pęku rur charakteryzują się wyraźnym zróżnicowaniem - występują obszary o wysokiej prędkości pomiędzy rurami, oraz obszary gdzie prędkość jest znacznie niższa, występujące ponad i poniżej rur. Pęcherze mogą unosić się swobodnie ku górze, nie napotykając na swojej drodze żadnych przeszkód. To powoduje że średnia prędkość dla badanego obszaru jest wysoka, lecz styk samych rur z obszarami gdzie prędkość jest wysoka odbywa się tylko po bokach rur.

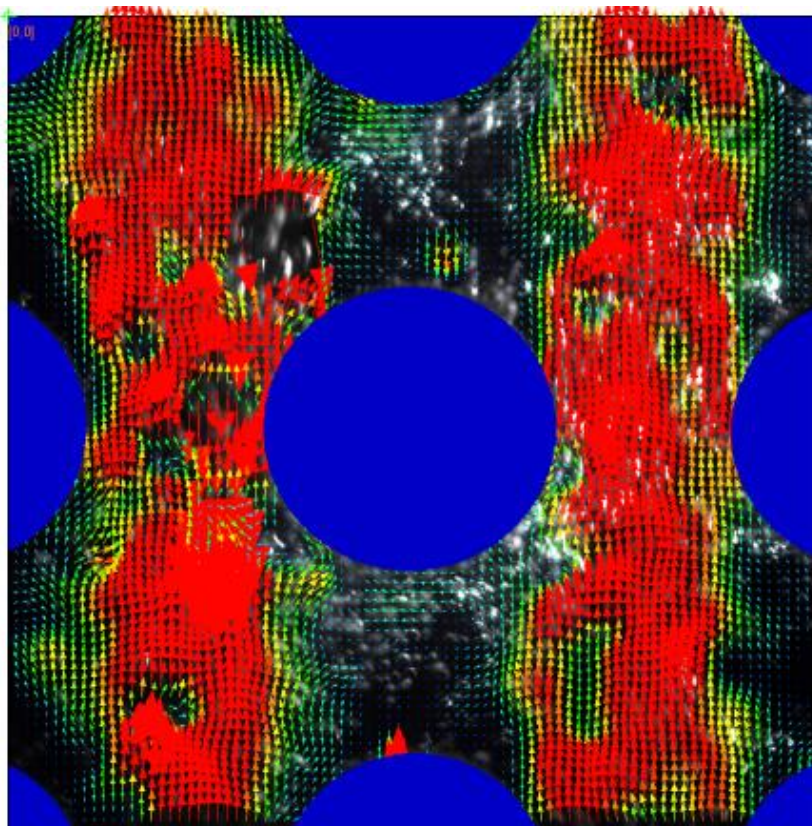
Na rysunkach od 10-10 do 10-18 pokazano pola prędkości w których oprócz skali kolorów podano także wektory informujące o wartości prędkości, ale także o kierunku.



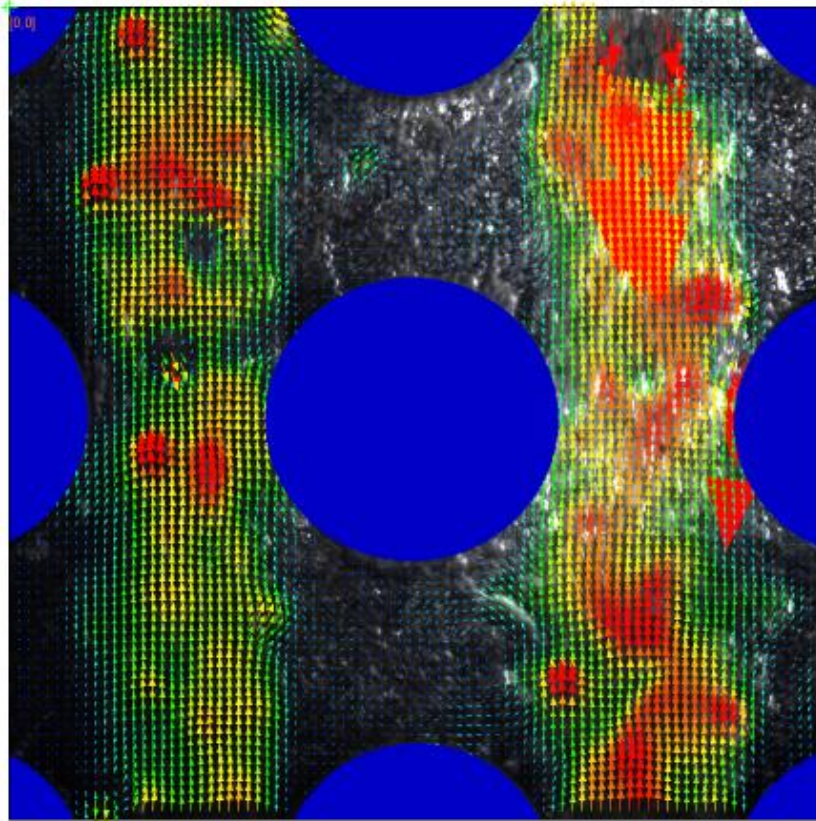
Rysunek 10-10. Wektorowe pole prędkości; L0800G10L



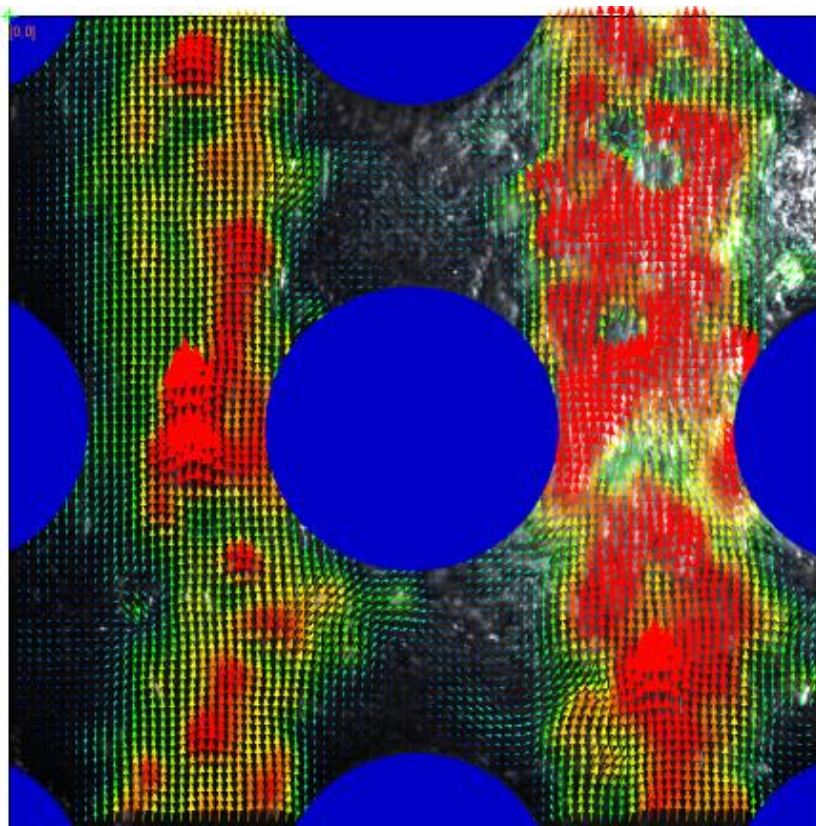
Rysunek 10-11. Wektorowe pole prędkości; L0800G30L



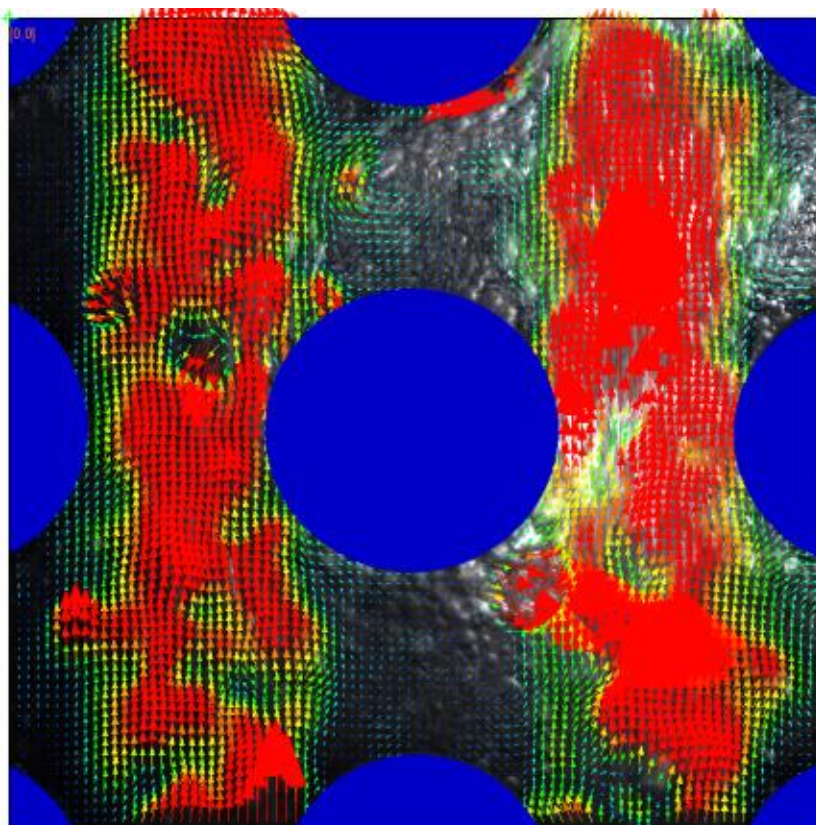
Rysunek 10-12. Wektorowe pole prędkości; L0800G60L



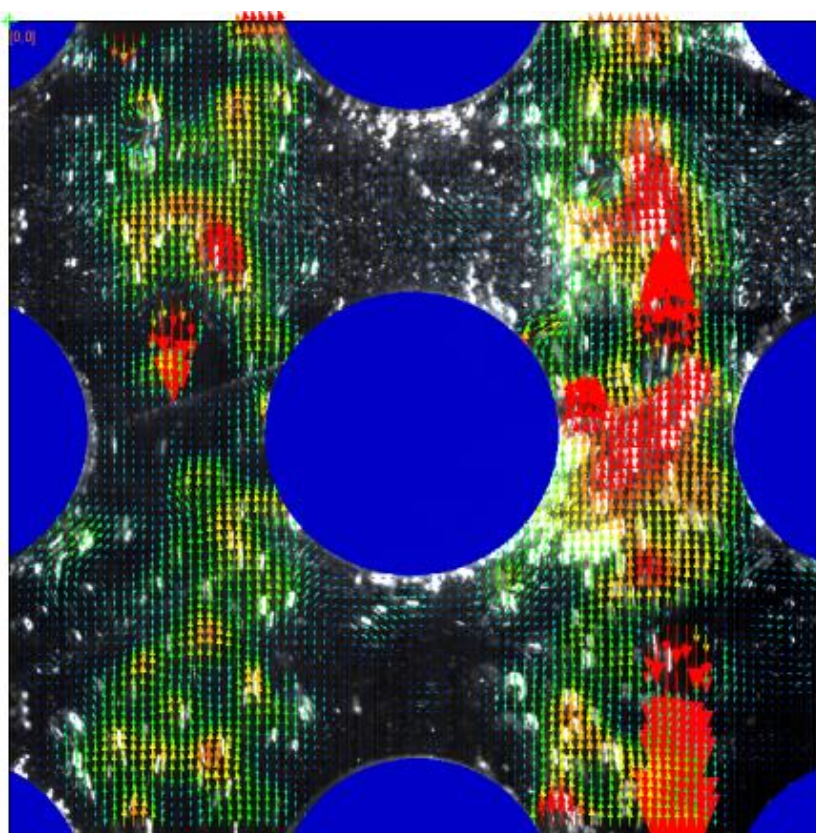
Rysunek 10-13. Wektorowe pole prędkości; L1000G10L



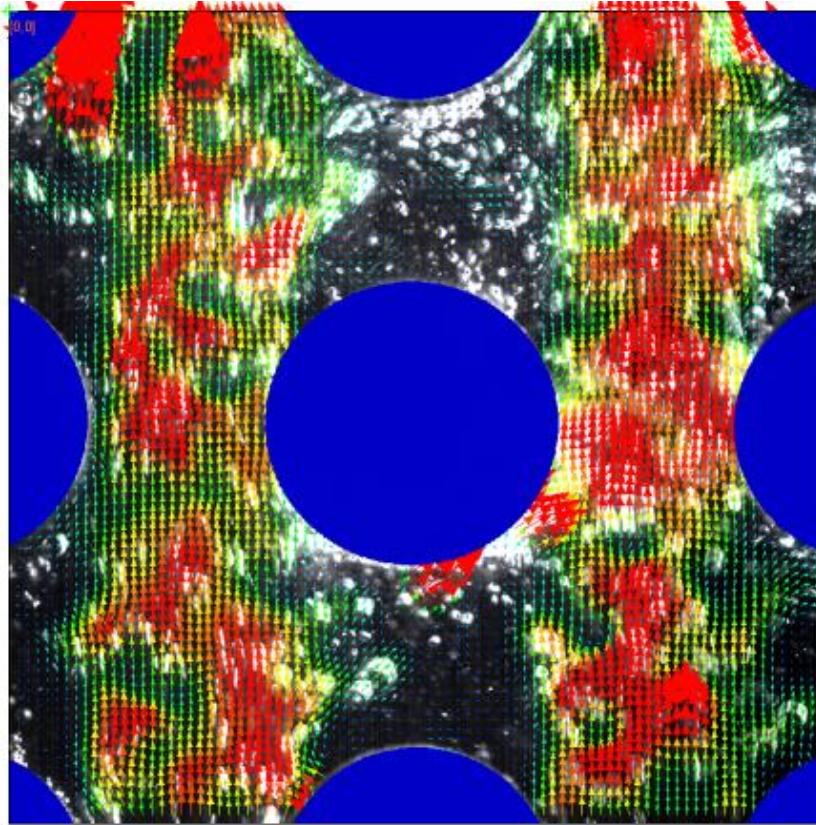
Rysunek 10-14. Wektorowe pole prędkości; L1000G30L



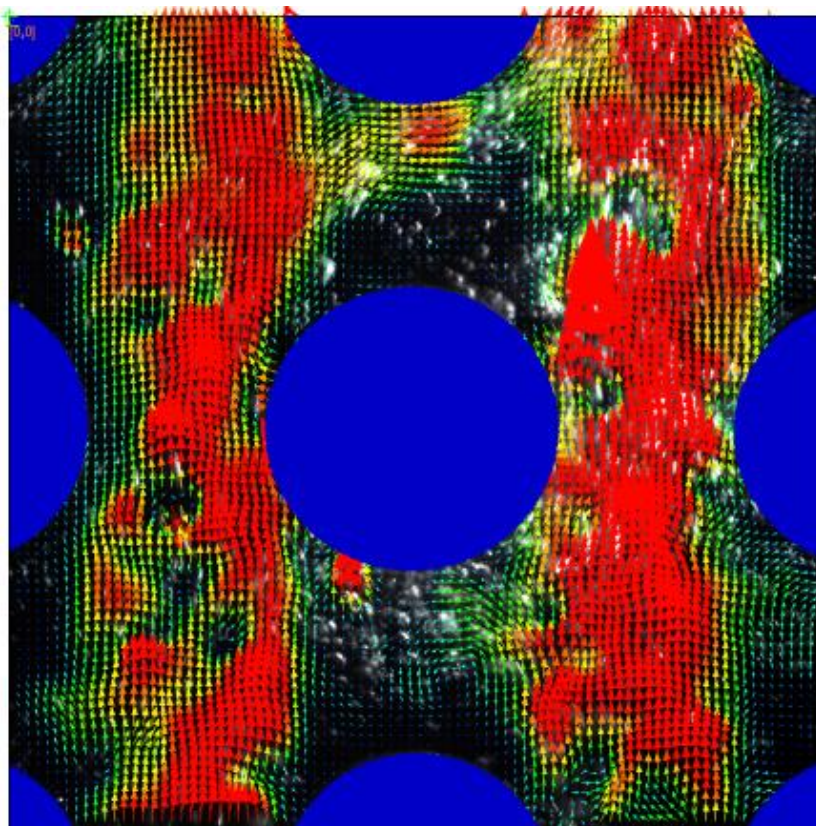
Rysunek 10-15. Wektorowe pole prędkości; L1000G60L



Rysunek 10-16. Wektorowe pole prędkości; L1200G10L



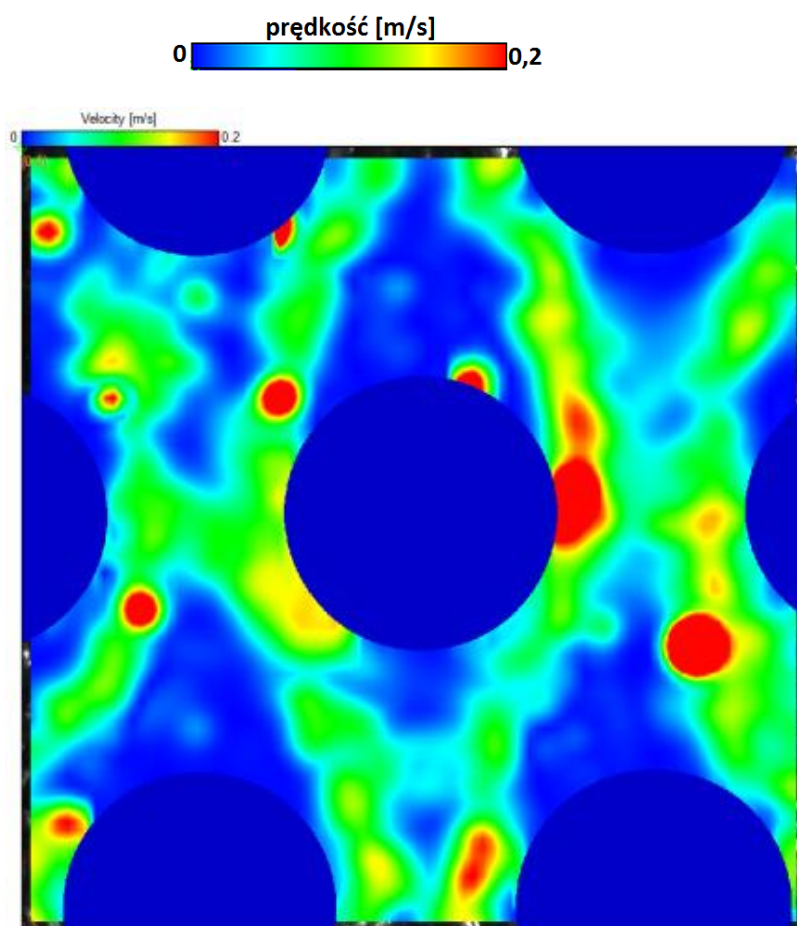
Rysunek 10-17. Wektorowe pole prędkości; L1200G30L



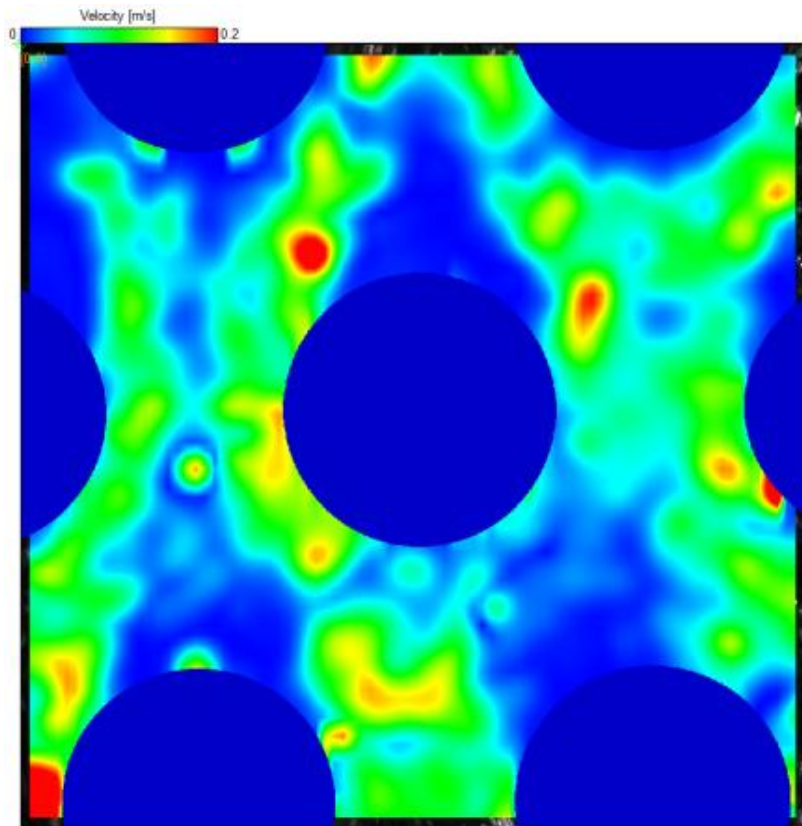
Rysunek 10-18. Wektorowe pole prędkości; L1200G60L

Analizując wektorowe pola prędkości można określić trajektorię przepływu mieszaniny dwufazowej. Dla układu szeregowego (rysunki 10-10 do 10-18) wyraźnie widać obszary pomiędzy rurami gdzie występuje przepływ wznoszący, nie zaburzony przeszkodami. Jednak występują czasami wektory skierowane ku dołowi lub bokom obszaru badawczego. Pokazuje to że pomimo nieziennej geometrii układu i ustalonych warunków przepływu przepływ dwufazowy jest nierównomierny. Nierównomierność ta wzrastała wraz ze wzrostem strumienia fazy gazowej. Dla wyższych strumieni gazu zaobserwowano wyraźniejszy podział pomiędzy strefami stagnacji a obszarami przepływu wznoszącego, lecz również w tych przypadkach częściej zauważono przepływ w kierunku innym niż wznoszący.

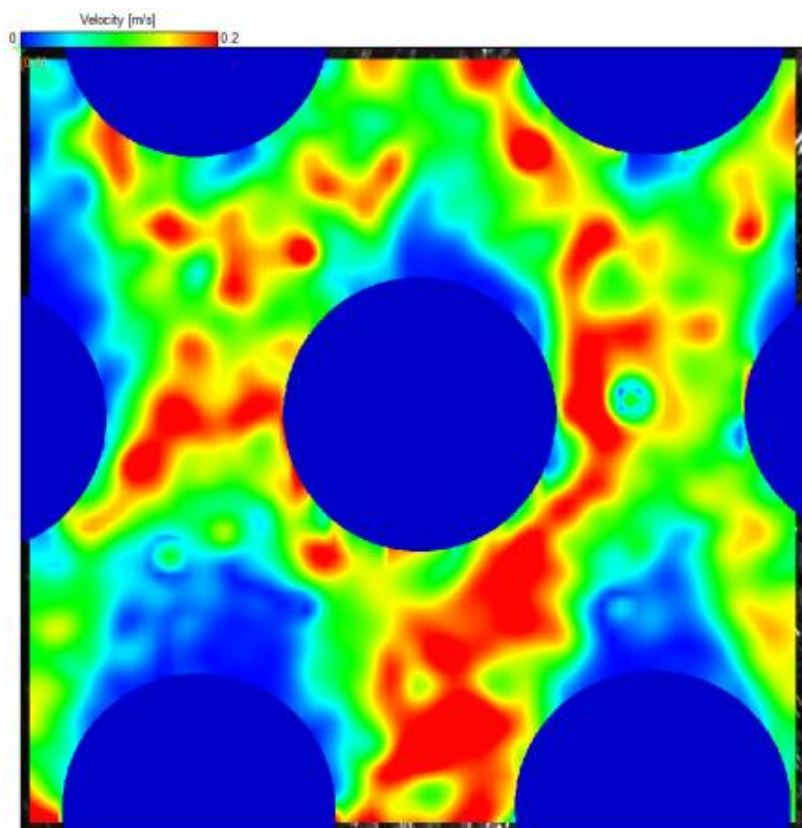
Na rysunkach od 10-19 do 10-27 przedstawiono przykłady wektorowych pól prędkości dla badań przestawnego pęku rur.



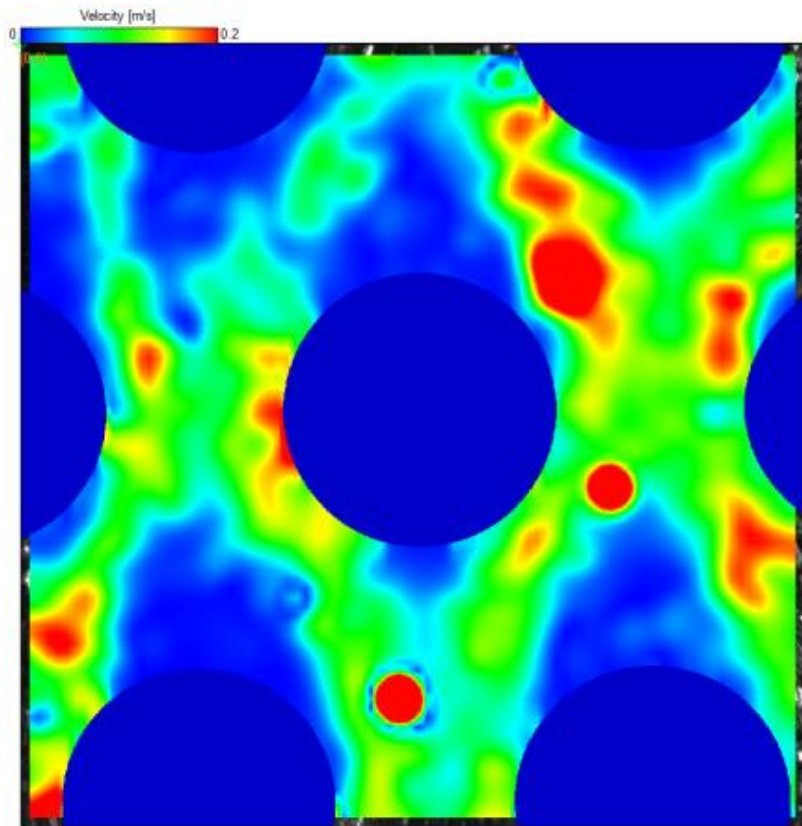
Rysunek 10-19. Pole prędkości; L0800G10S



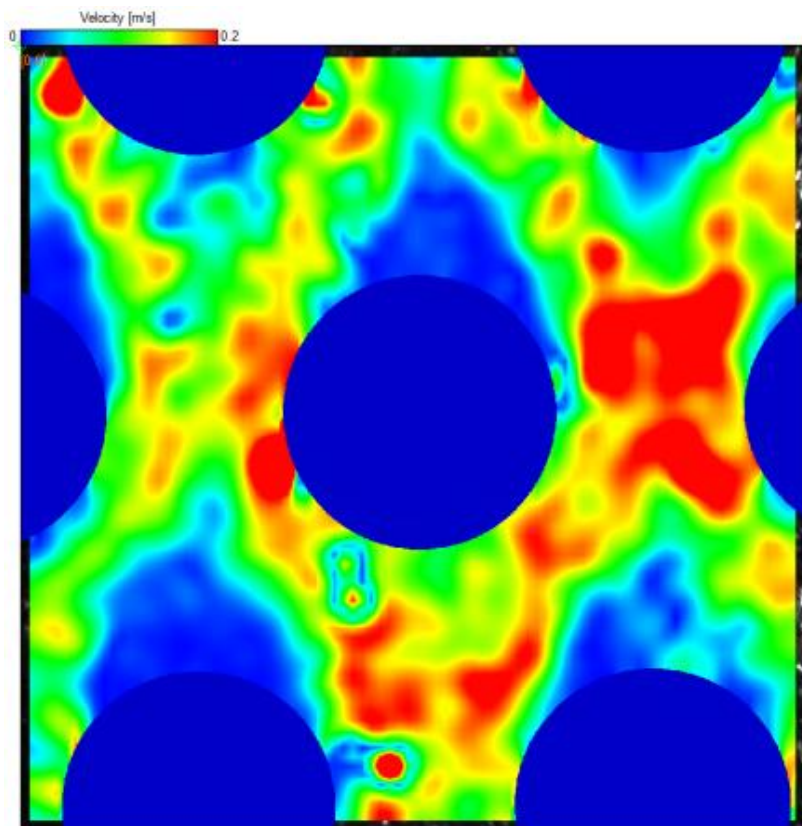
Rysunek 10-20. Pole prędkości; L0800G30S



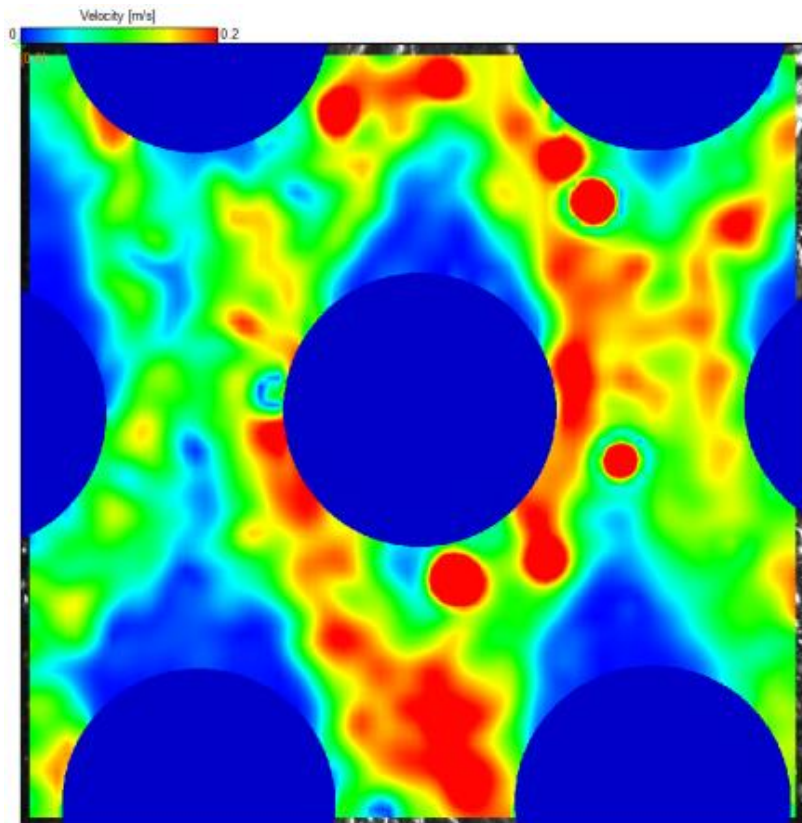
Rysunek 10-21. Pole prędkości; L0800G60S



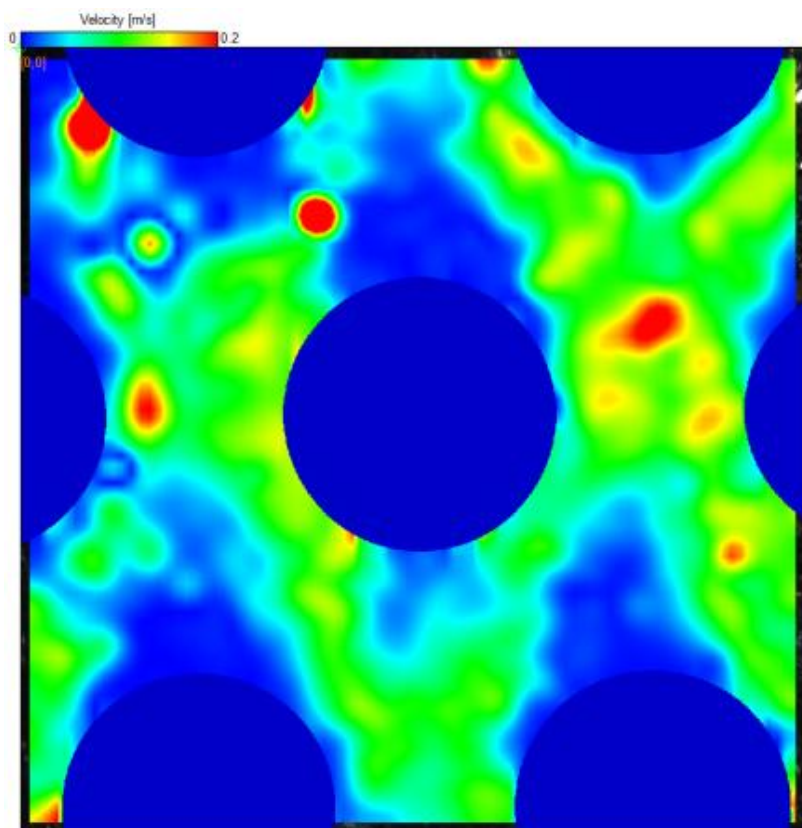
Rysunek 10-22. Pole prędkości; L1000G10S



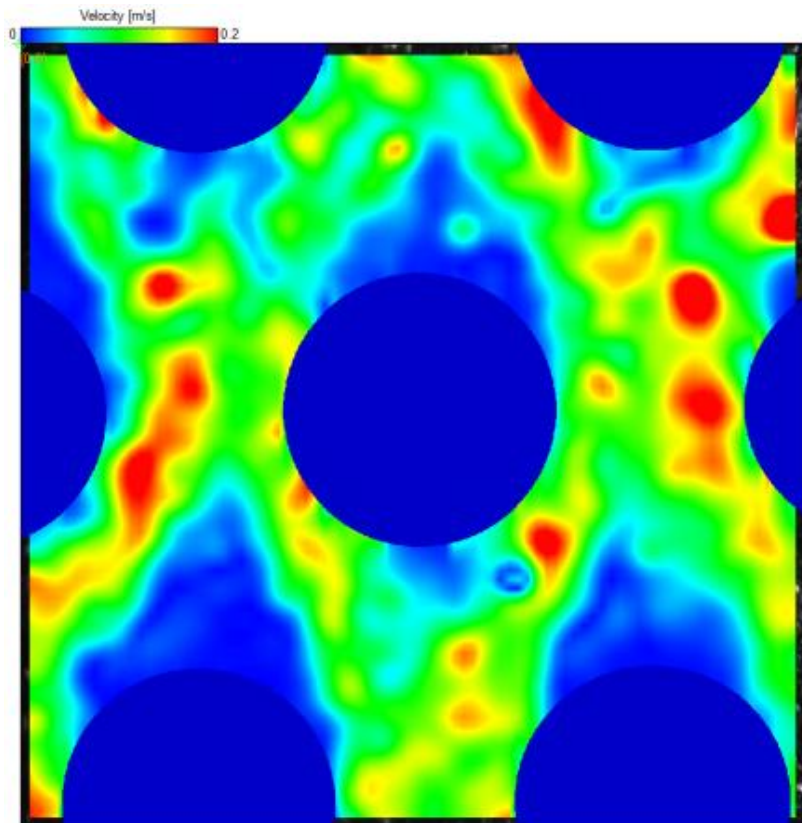
Rysunek 10-23. Pole prędkości; L1000G30S



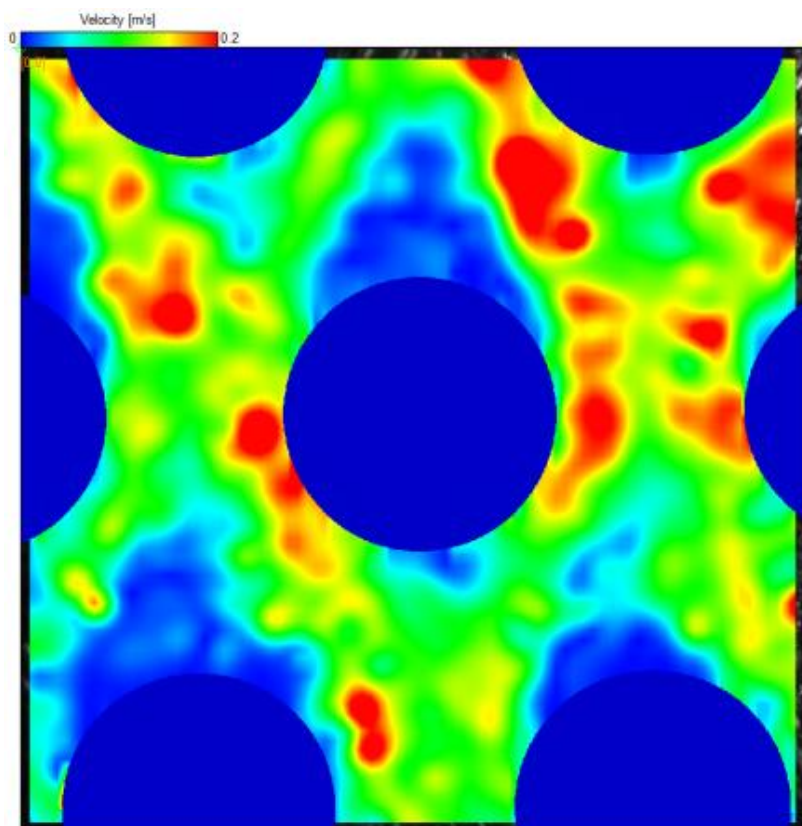
Rysunek 10-24. Pole prędkości; L1000G60S



Rysunek 10-25. Pole prędkości; L1200G10S

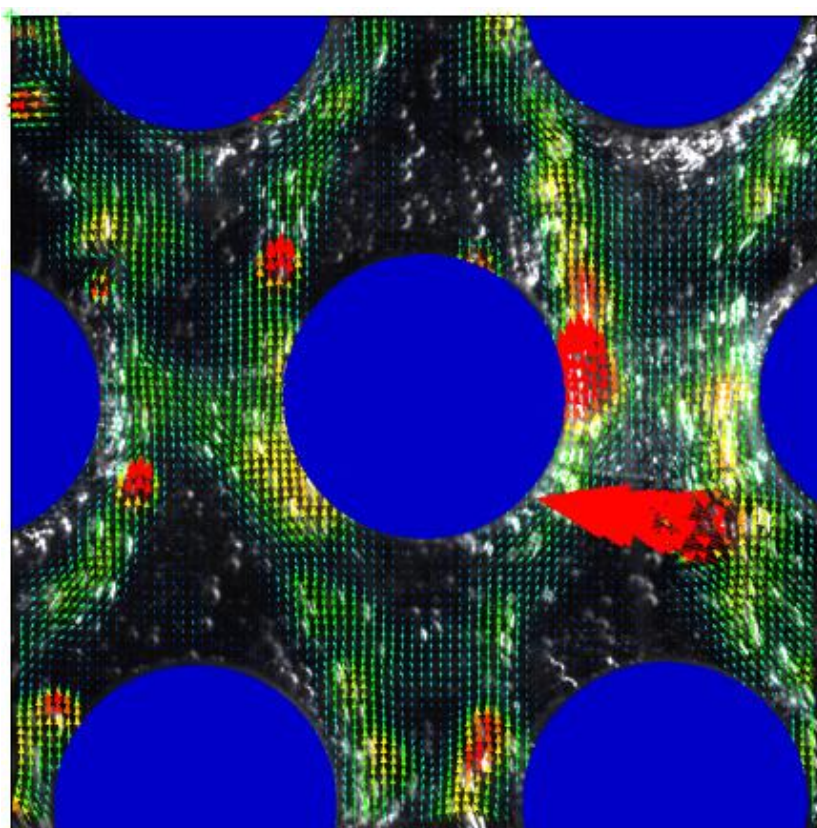


Rysunek 10-26. Pole prędkości; L1200G30S

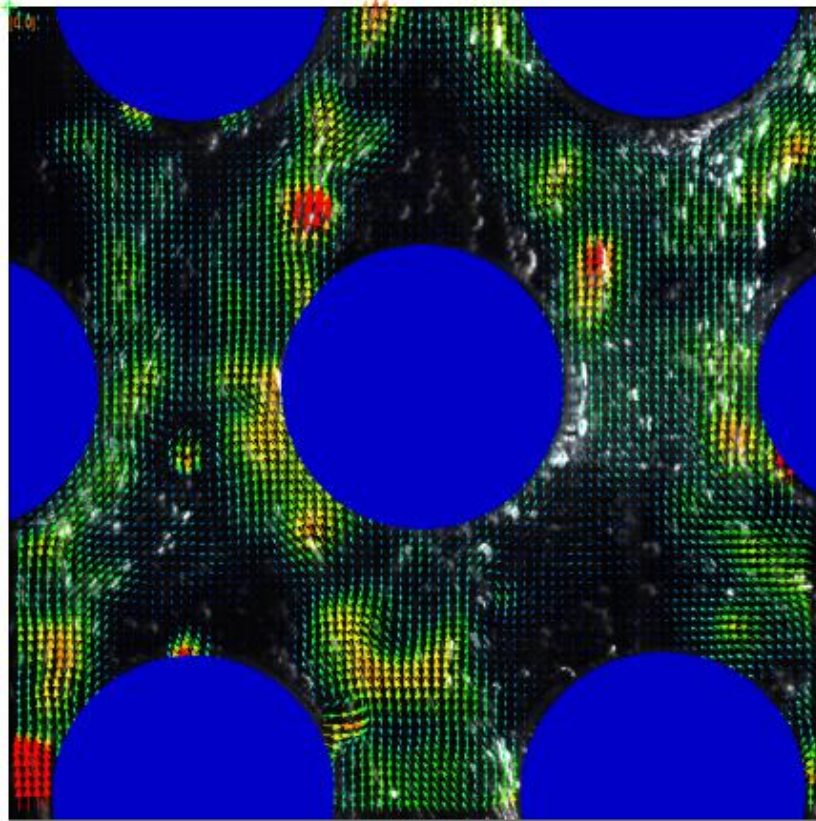


Rysunek 10-27. Pole prędkości; L1200G60S

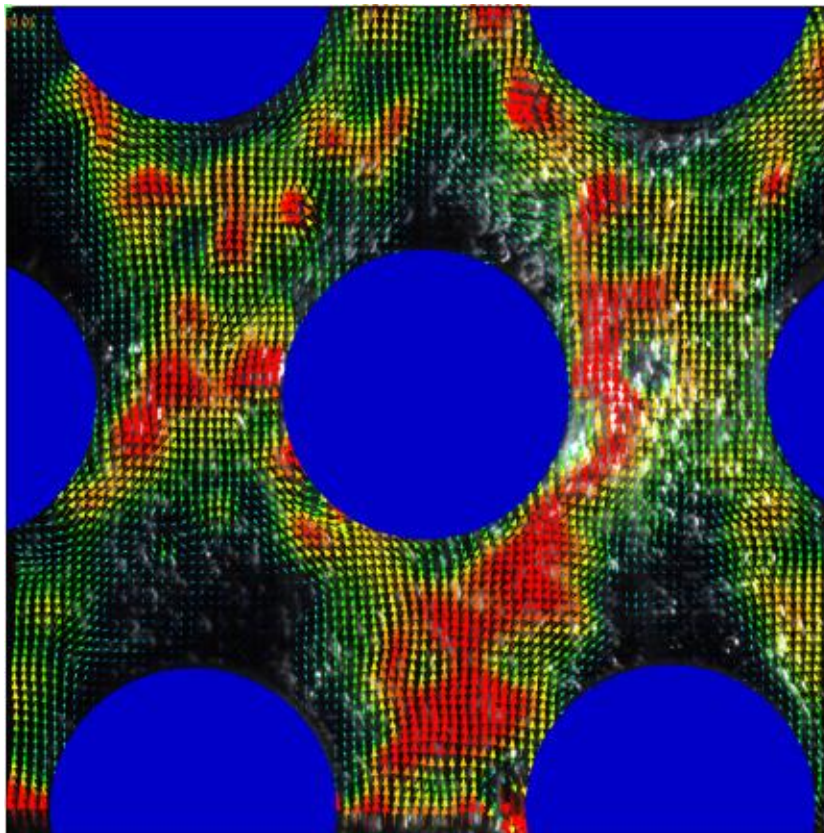
Pola prędkości dla przepływu wokół przestawnego pęku rur charakteryzują się mniejszym zróżnicowaniem na obszary o wysokiej prędkości pomiędzy rurami, oraz obszary gdzie prędkość jest znacznie niższa, w porównaniu z pękiem rur o ustawieniu szeregowym. Unoszące się pęcherze napotykaają na swej drodze rurki przez co prędkość ich wznoszenia maleje, lecz rozkład prędkości jest równomierny i strefy stagnacji są mniejsze. To powoduje że średnia prędkość dla badanego obszaru jest niższa w porównaniu z układem szeregowym. Obszary stagnacji występują tylko za rurkami i są znacznie mniejsze w porównaniu z układem szeregowym. Na rysunkach od 10-28 do 10-36 przedstawiono przykłady pól prędkości dla badań przestawnego pęku rur.



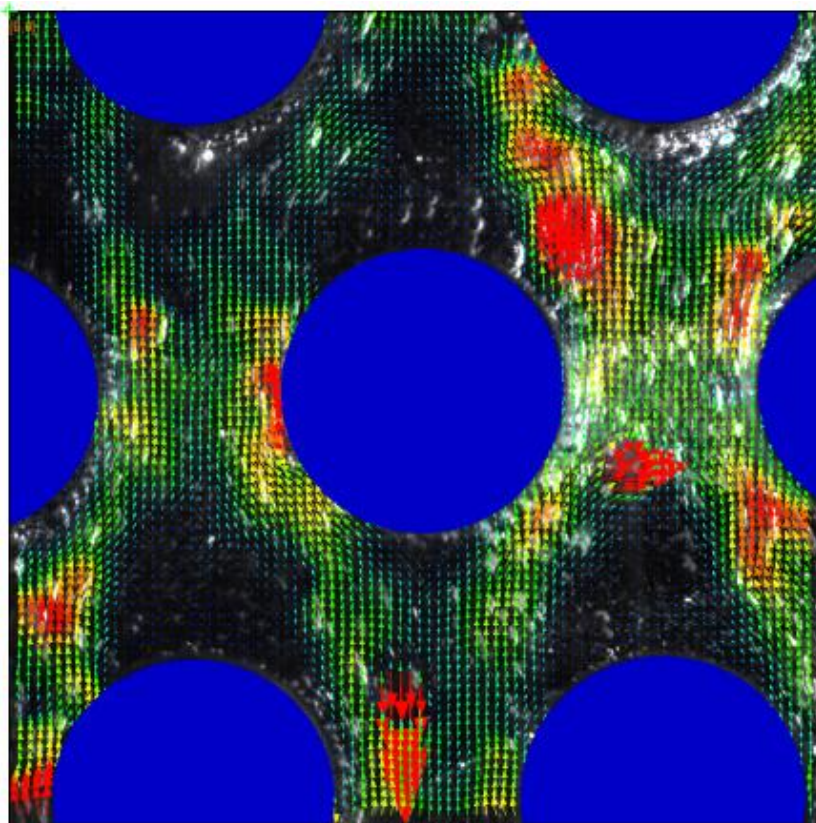
Rysunek 10-28. Wektorowe pole prędkości; L0800G10S



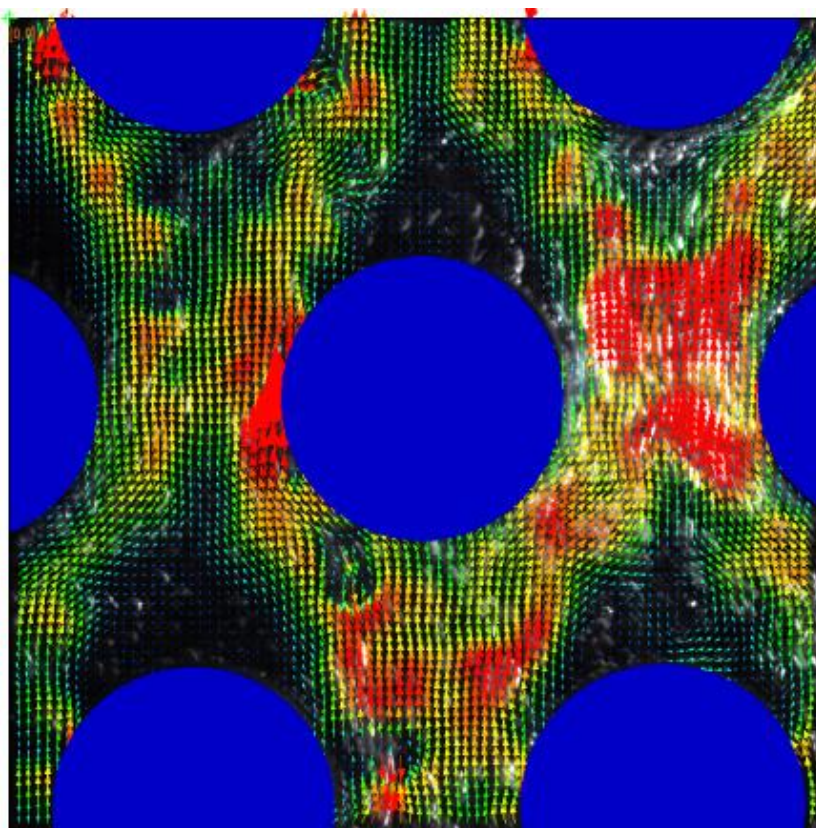
Rysunek 10-29. Wektorowe pole prędkości; L0800G30S



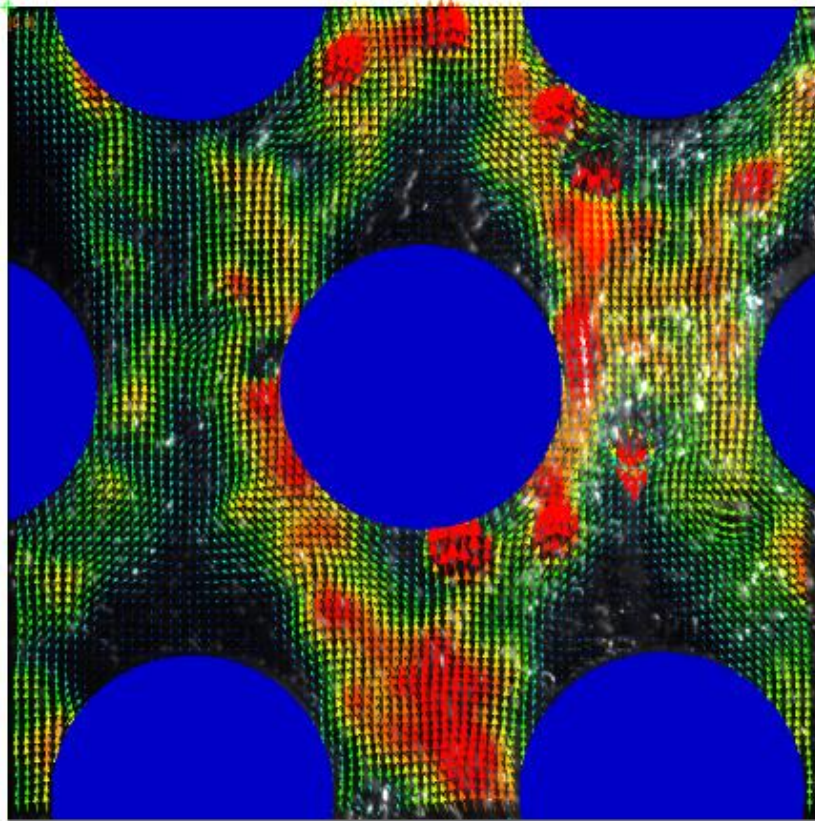
Rysunek 10-30. Wektorowe pole prędkości; L0800G60S



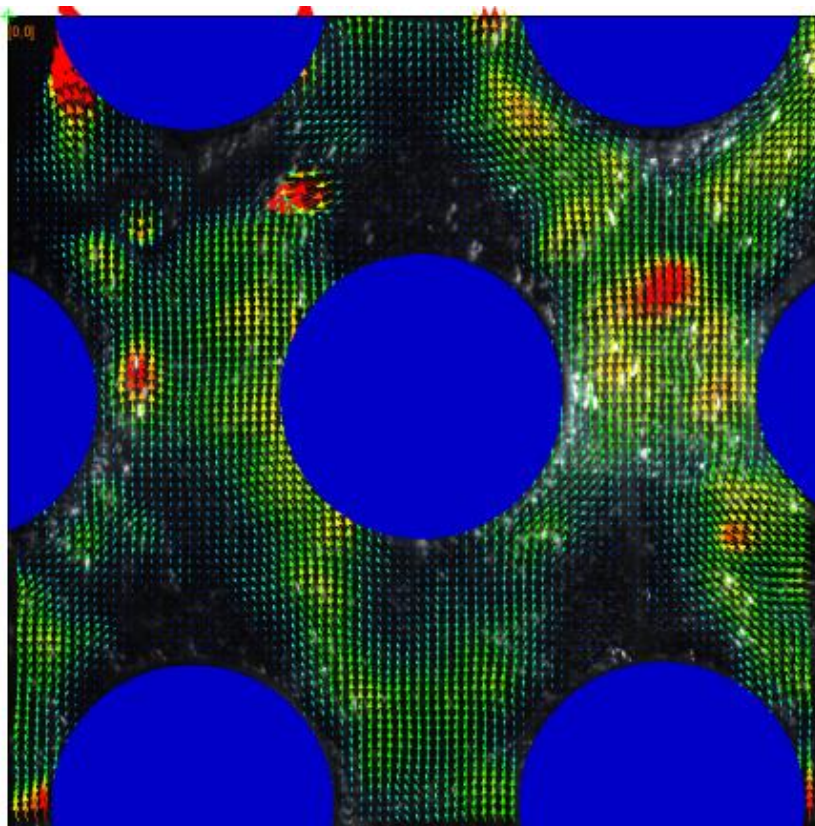
Rysunek 10-31. Wektorowe pole prędkości; L1000G10S



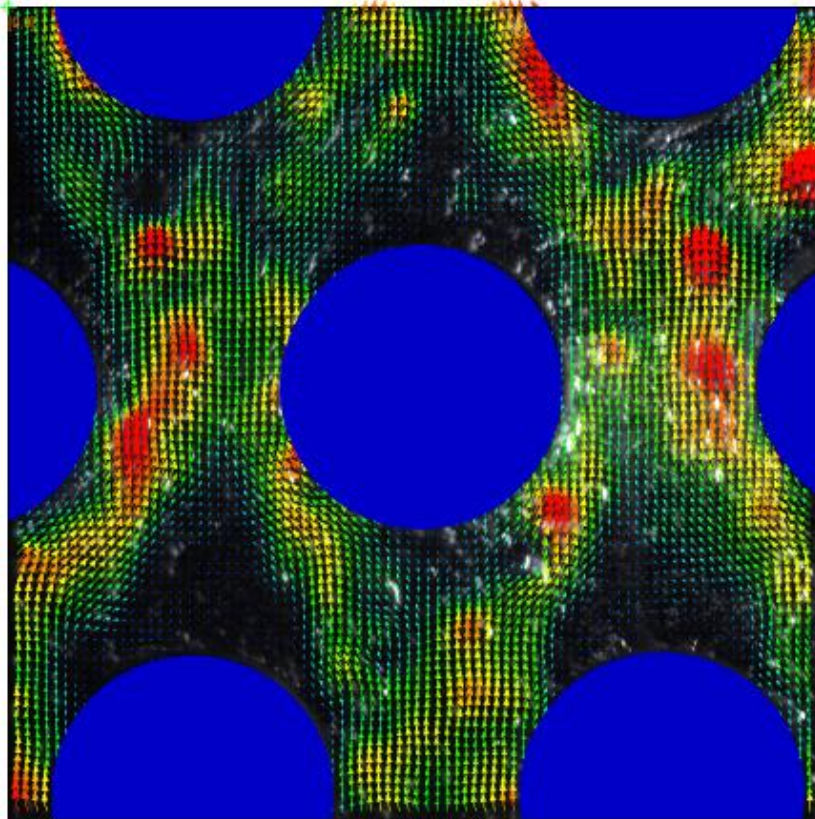
Rysunek 10-32. Wektorowe pole prędkości; L1000G30S



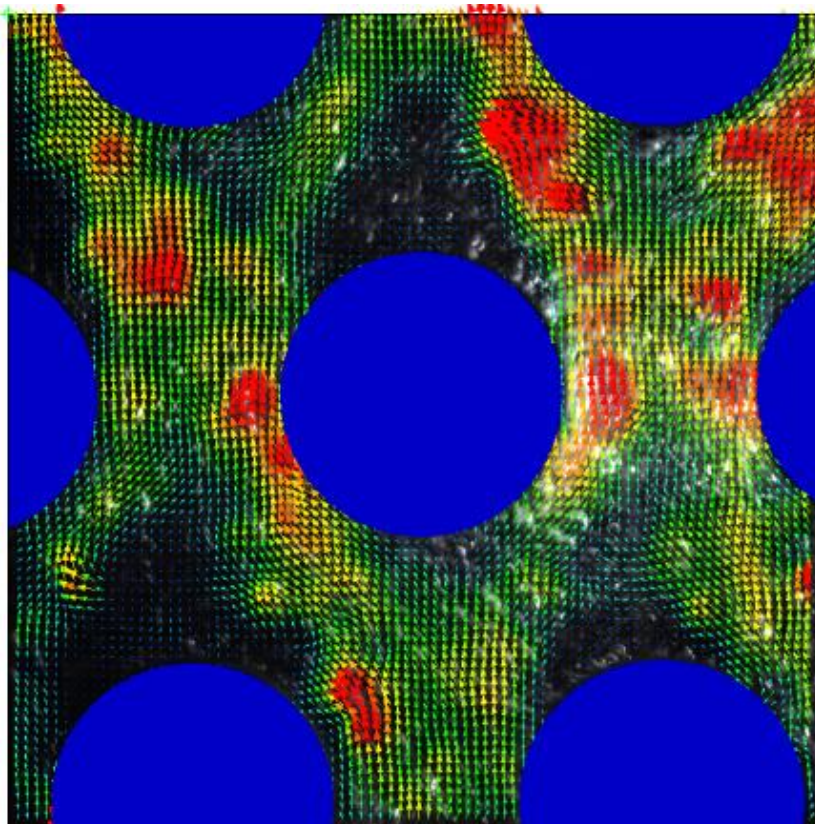
Rysunek 10-33. Wektorowe pole prędkości; L1000G60S



Rysunek 10-34. Wektorowe pole prędkości; L1200G10S



Rysunek 10-35. Wektorowe pole prędkości; L1200G30S

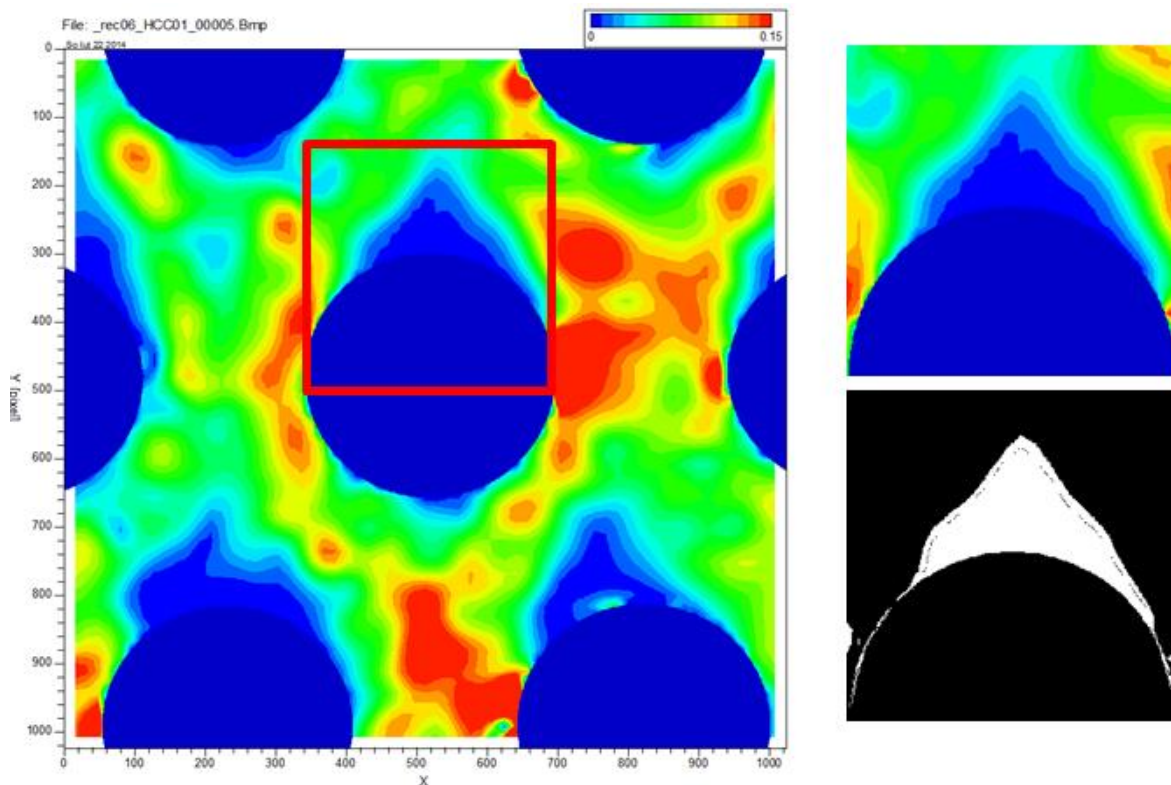


Rysunek 10-36. Wektorowe pole prędkości; L1200G60S

Generalnie, dla układu przestawnego przepływ ma bardziej jednorodny charakter. Mniejsze prędkości wznoszenia się pęcherzy powodują, że przepływ odbywa się zdecydowanie ku górze omywając rurki i rzadziej niż w przypadku szeregowego układu rur pojawiają się wektory skierowane w innym kierunku.

Na podstawie wyników badań metodą DPIV analizie poddano również strefy stagnacji będące cechą charakterystyczną przepływu wokół rur. Występują one bezpośrednio za rurkami, a w strefach tych prędkość przepływu jest znacznie niższa niż w pozostałych obszarach. Wizualizacja przepływu dwufazowego w przestrzeni międzyrurkowej umożliwiła wyznaczenie powierzchni stref stagnacji występujących za powierzchnią rur. Wyniki tych analiz przedstawiają tabele 10-1 i 10-2.

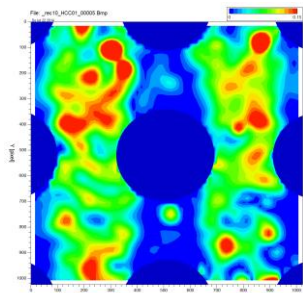
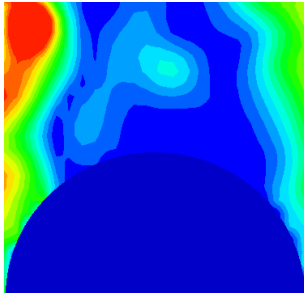

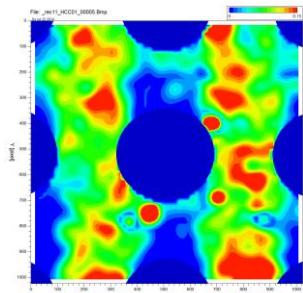
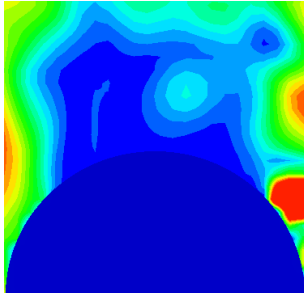
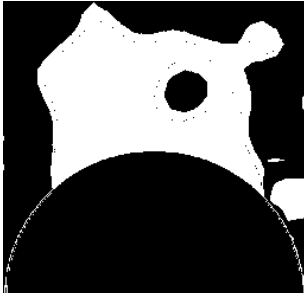
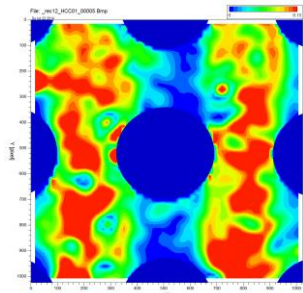
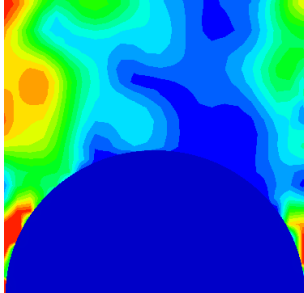

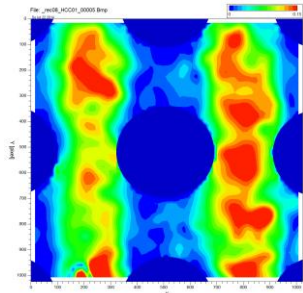
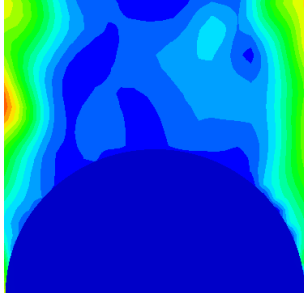
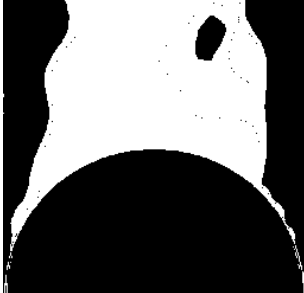
W celu zbadania wielkości stref stagnacji dokonano wyboru strefy reprezentatywnej o polu powierzchni kwadratu którego dolny bok pokrywał się ze średnicą badanej rurki. Strefę ilustruje rysunek 10-37. w strefie tej określono udział procentowy objętości strefy stagnacji w odniesieniu do całego obszaru. w tym celu określono próg szarości odpowiadający prędkości przepływu 0,028 m/s, czyli około 35% średniej prędkości mieszaniny dwufazowej dla wszystkich pomiarów.



Rysunek 10-37 Obszar badawczy stref stagnacji.

Przyjęto procedurę progowania, że wszystkie piksele o odcieniu ciemniejszym od ustalonego progu zostały zamienione na kolor biały, pozostałe piksele – kolor czarny. w celu określenia udziału stref stagnacji zliczono piksele obydwu kolorów i wyznaczono udział procentowy w badanym obszarze. w prawej kolumnie tabeli 10-1 i tabeli 10-2 przedstawiono wyniki procedury progowania.

Tabela 10-1. Zestawienie stref stagnacji dla układu szeregowego

L0800G10L			
L0800G30L			
L0800G60L			
L1000G10L			

Ciąg dalszy tabeli 10-1

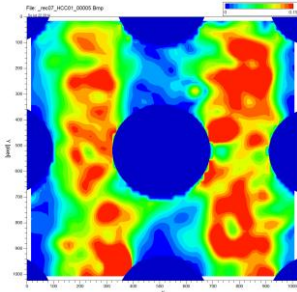
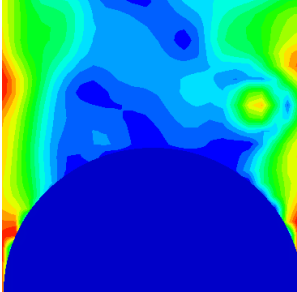
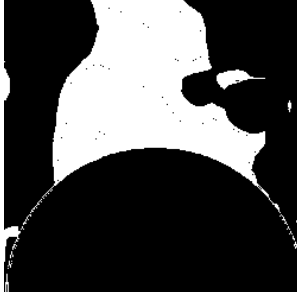
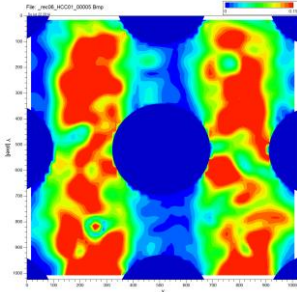
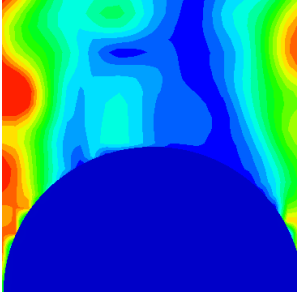
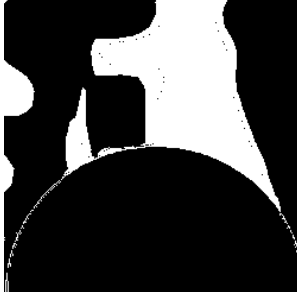
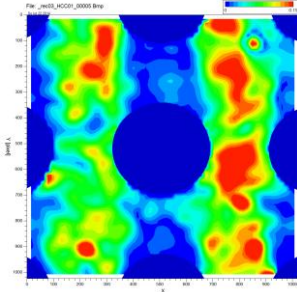
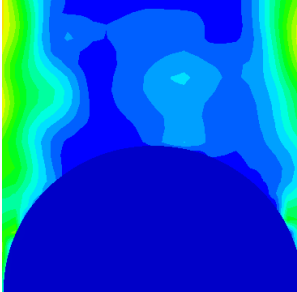

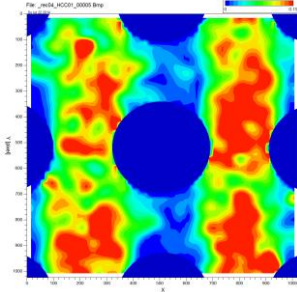
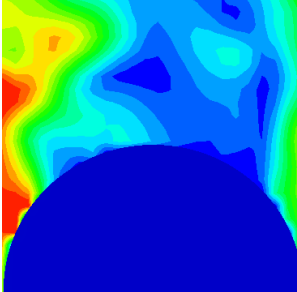

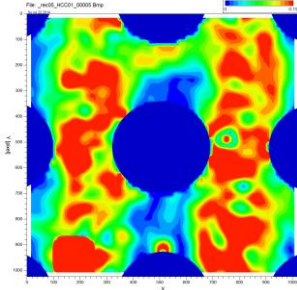
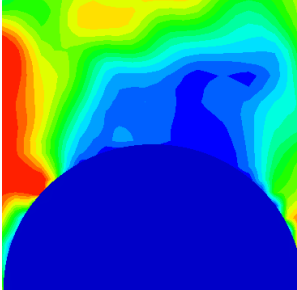

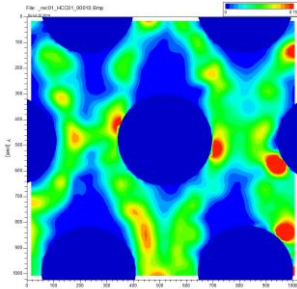
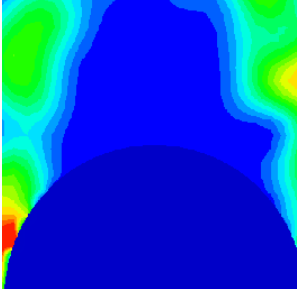

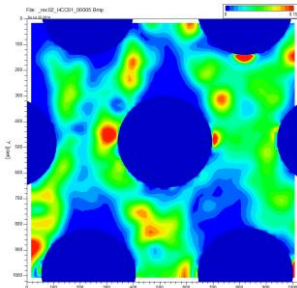
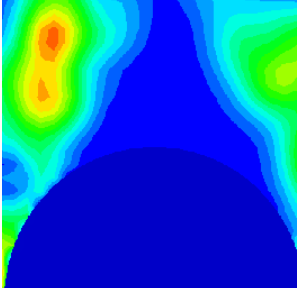

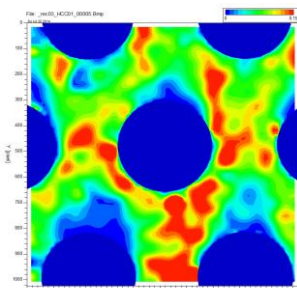
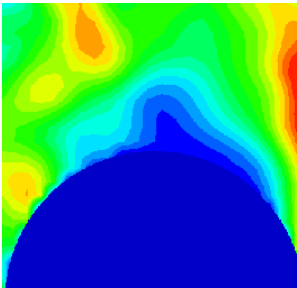

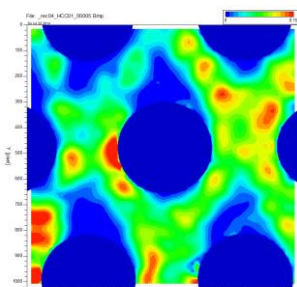
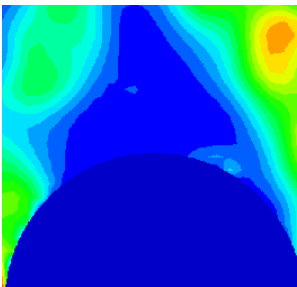

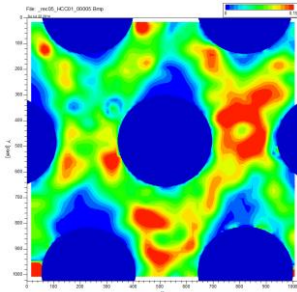
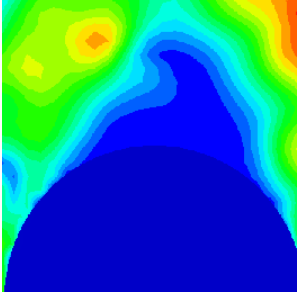

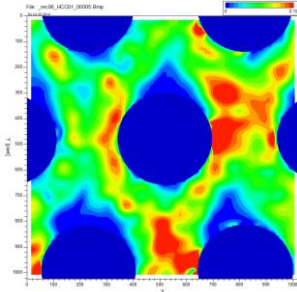
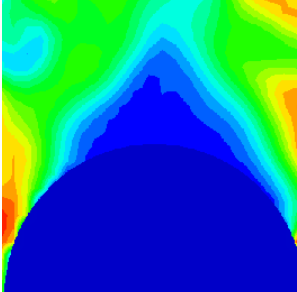

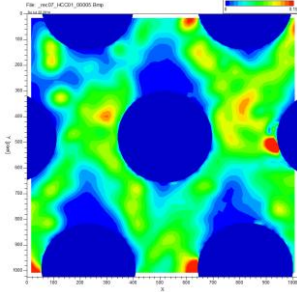
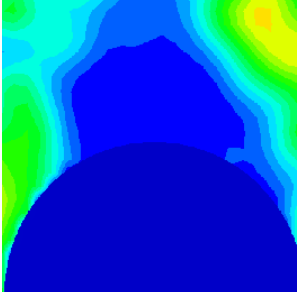

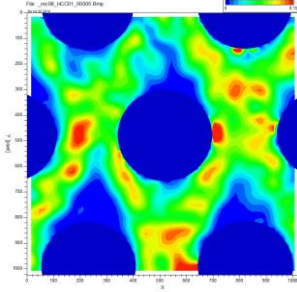
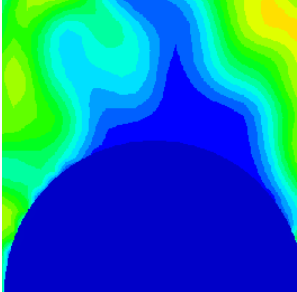
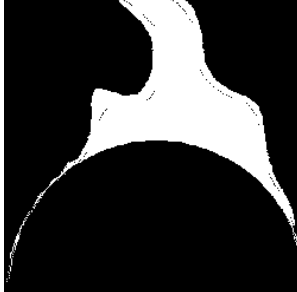
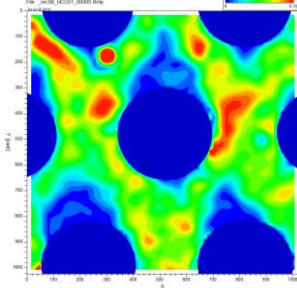
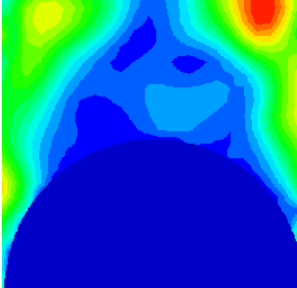
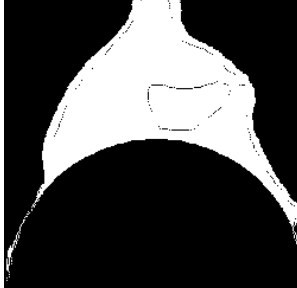
L1000G30L			
L1000G60L			
L1200G10L			
L1200G30L			
L1200G60L			

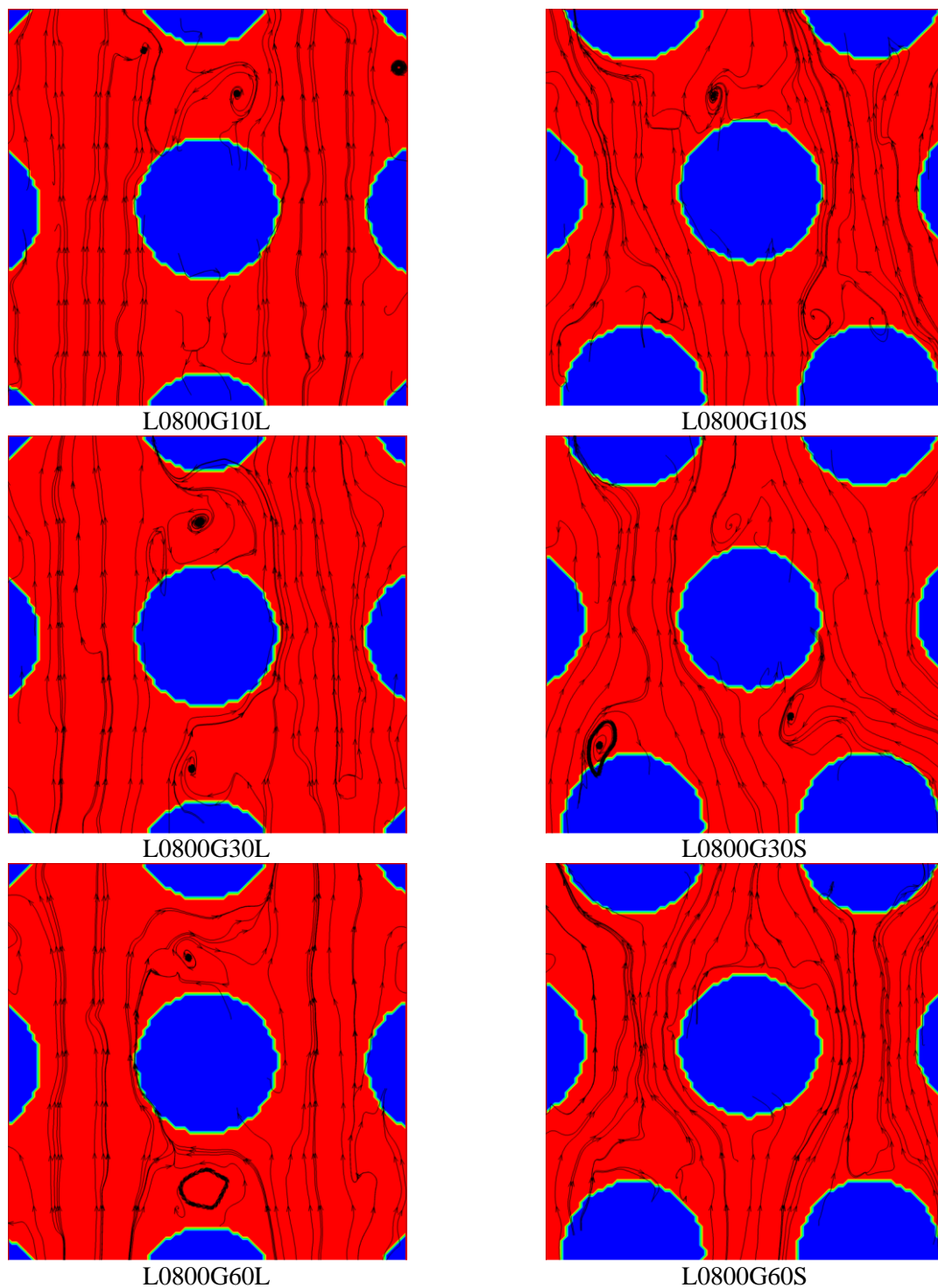
Tabela 10-2. Zestawienie stref stagnacji dla układu przestawnego.

L0800G10S			
L0800G30S			
L0800G60S			
L1000G10S			

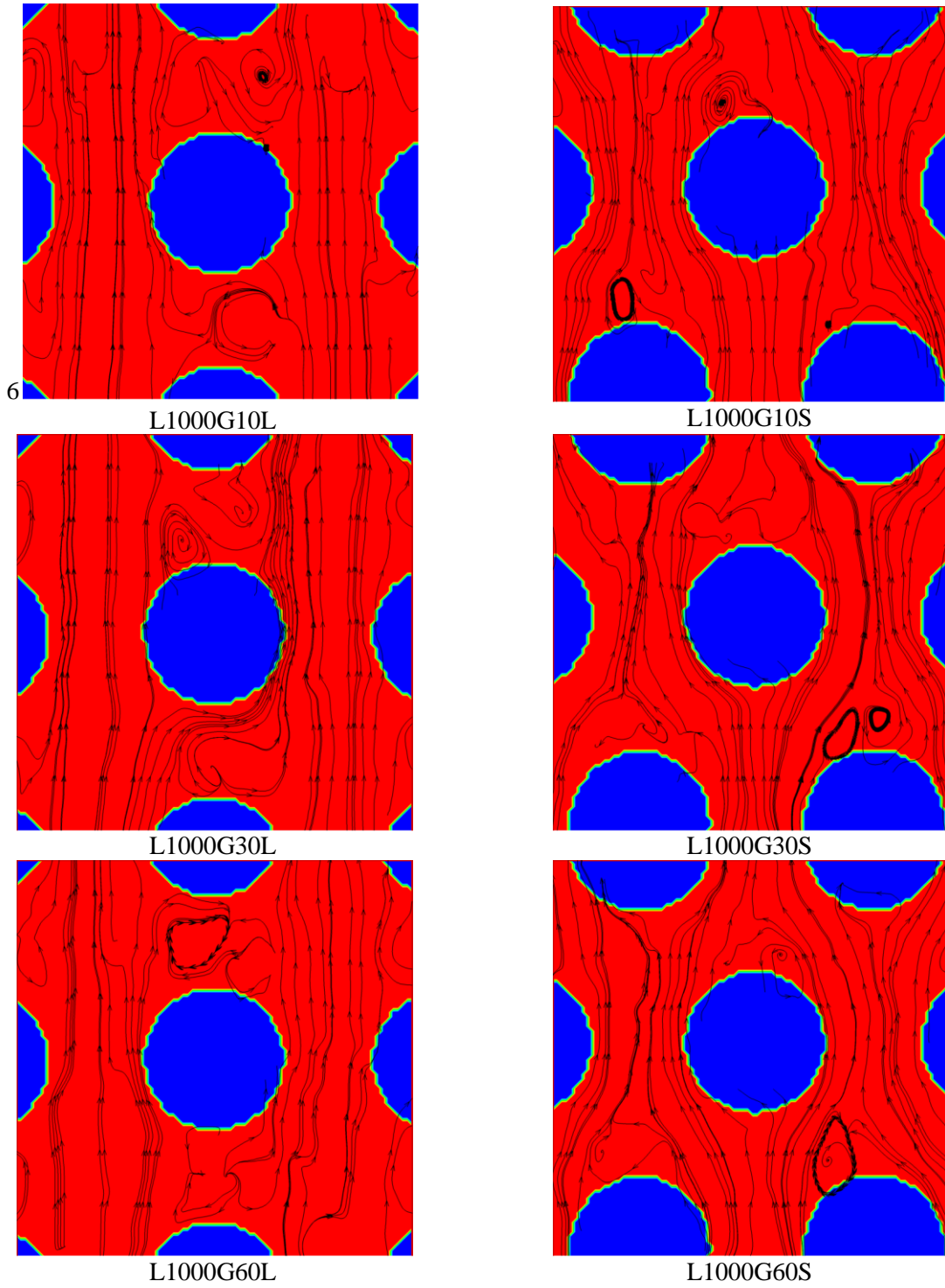
Ciąg dalszy tabeli 10-2

L1000G30S			
L1000G60S			
L1200G10S			
L1200G30S			
L1200G60S			

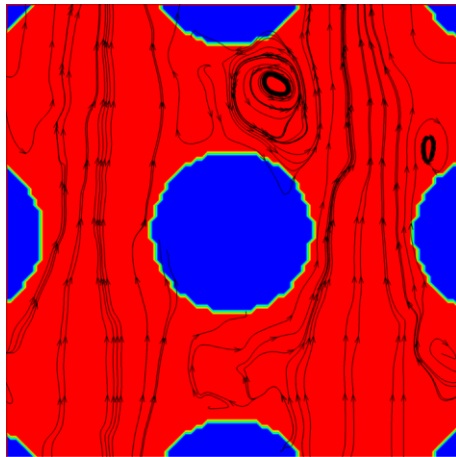
Dodatkowo na podstawie danych uzyskanych metodą DPIV wyznaczono linie prądu za pomocą których można wskazać na występowanie stref zawirowań, jako prawdopodobne źródło występowania stref stagnacji, oraz przeanalizować kierunki przepływu. Zestawienie uzyskanych pól przepływu z naniesionymi liniami prądu przedstawiają rysunki od 10-38 do 10-40.



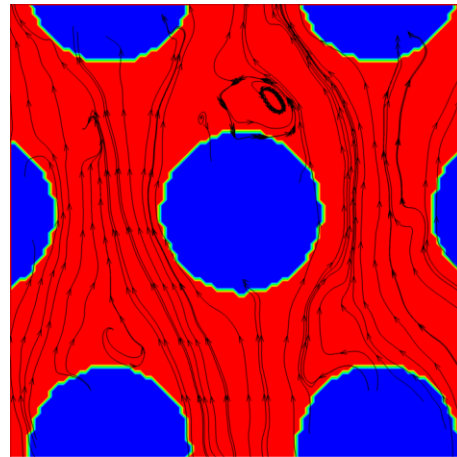
Rysunek 10-38. Zestawienie linii prądu dla strumienia cieczy 800 dm³/h



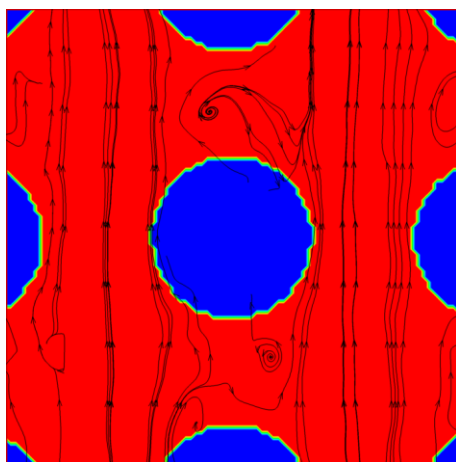
Rysunek 10-39. Zestawienie linii prądu dla strumienia cieczy 1000 dm³/h



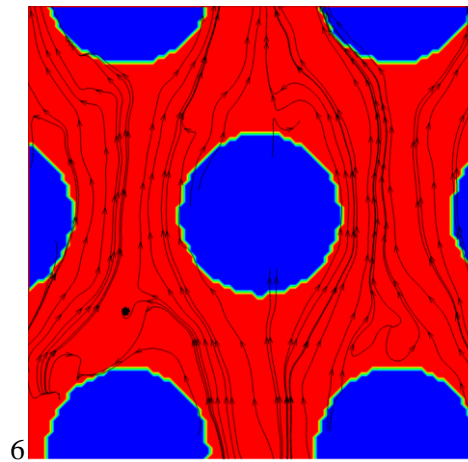
L1200G10L



L1200G10S

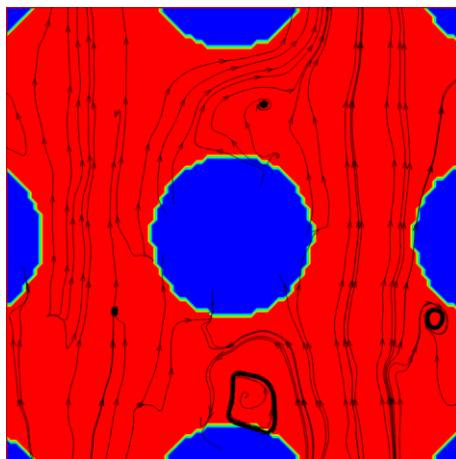


L1200G30L

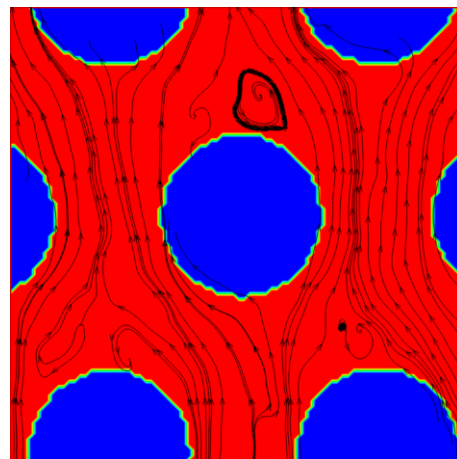


6

L1200G30S



L1200G60L

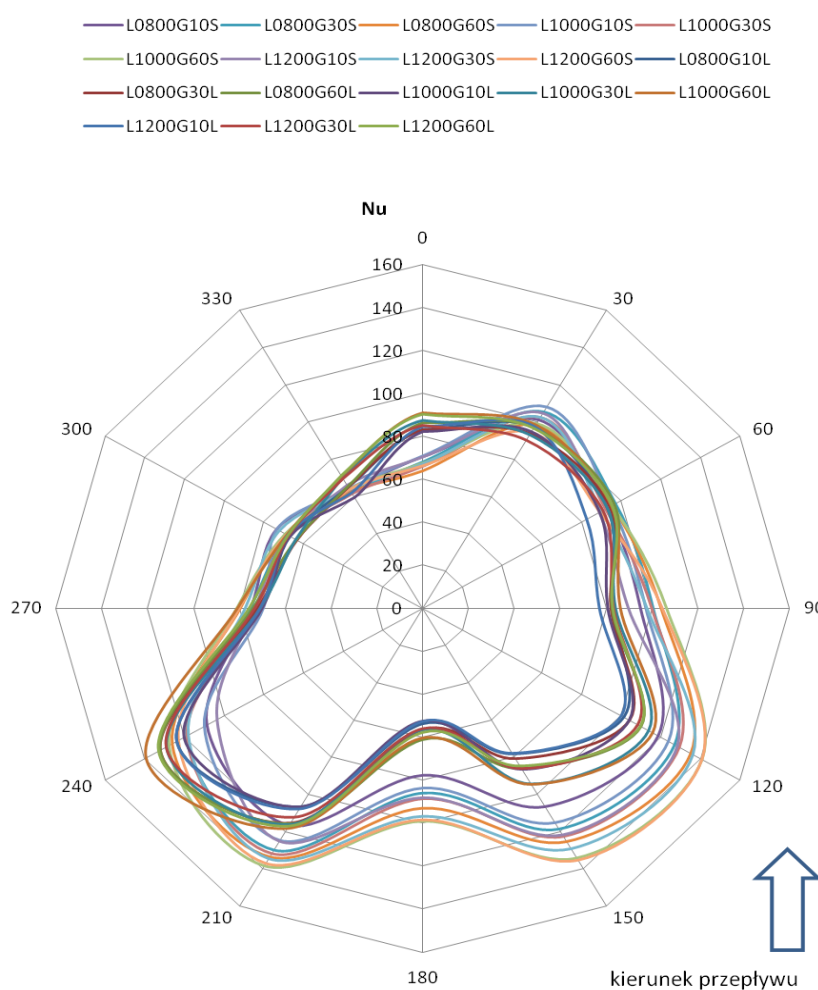


L1200G60S

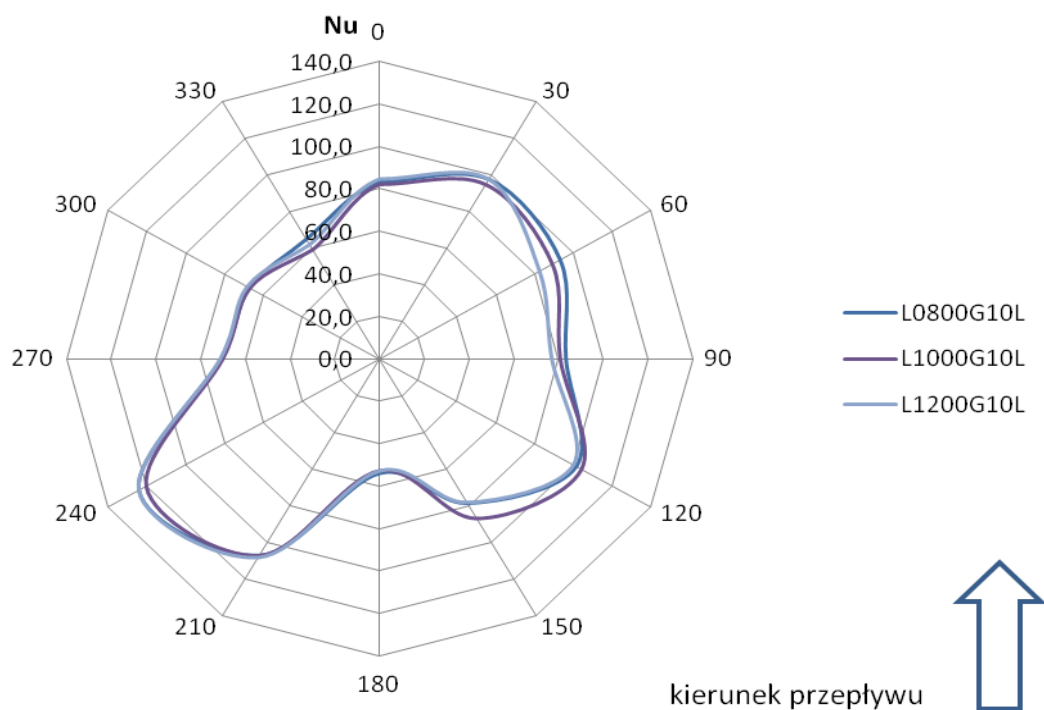
Rysunek 10-40. Zestawienie linii prądu dla strumienia cieczy 1200 dm³/h

11. Wyniki badań wykonanych metodą elektrochemiczną

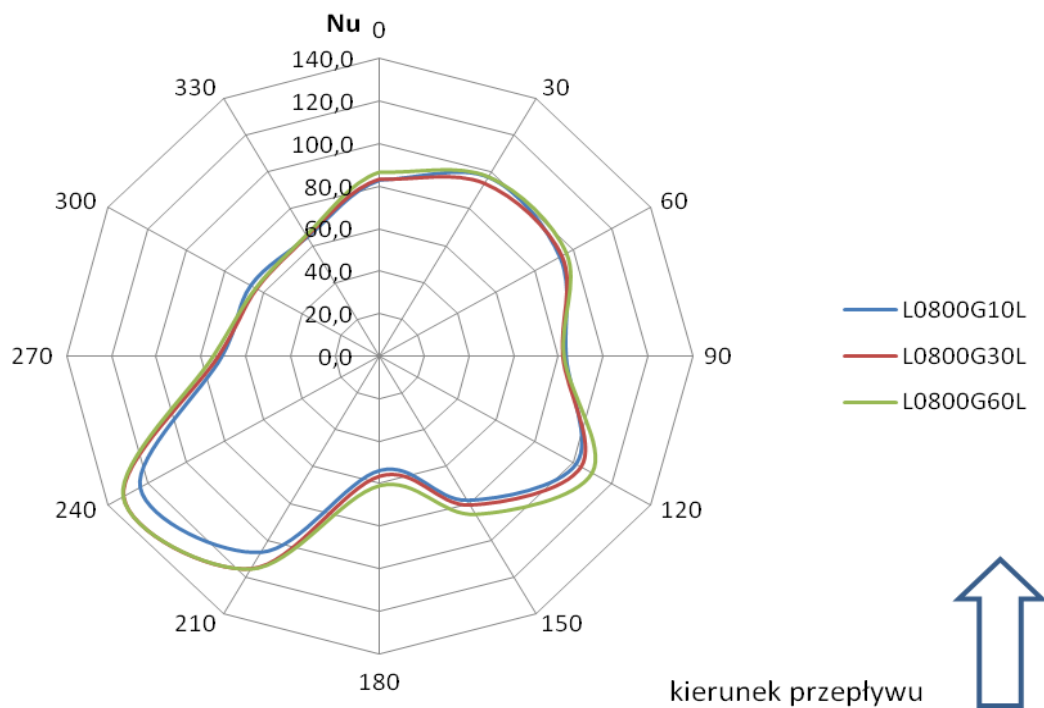
Rezultaty badań przedstawiono w postaci radarowych wykresów liczb Nusselta na obwodzie rurki. Wyniki zestawiono w taki sposób aby dokonać oceny wpływu wielkości strumieni poszczególnych faz oraz rodzaju pęku, w którym umieszczono katodę na równomierność i intensywność wymiany ciepła na powierzchni rurki. Informacje te pozwolą w dalszej części pracy na analizę wpływu układu rur oraz strumieni dozowanych faz na intensywność wymiany ciepła.



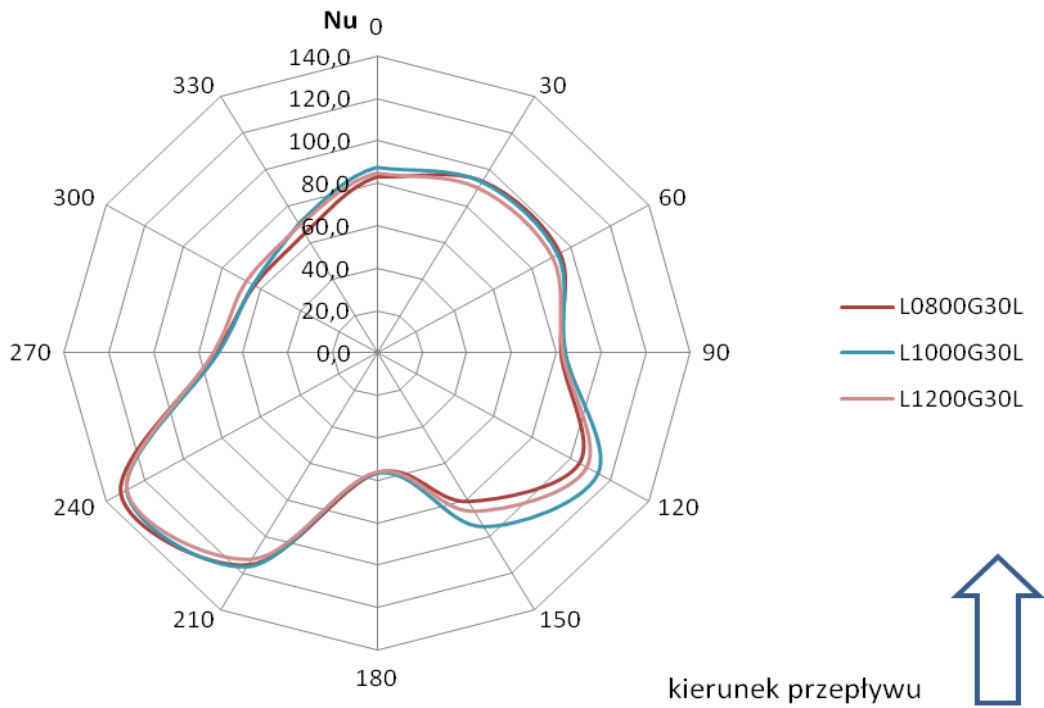
Rysunek 11-1. Zestawienie wartości liczby Nusselta dla wszystkich pomiarów



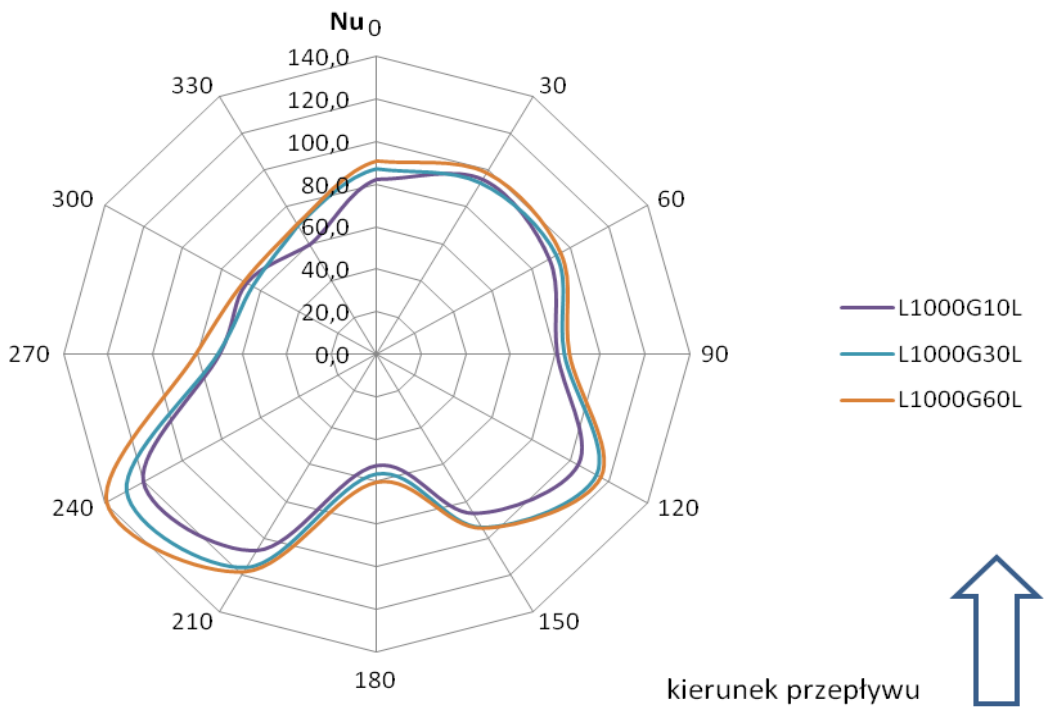
Rysunek 11-2. Wartości liczby Nusselta dla układu szeregowego i strumienia gazu $10 \text{ dm}^3/\text{h}$ – wpływ strumienia cieczy



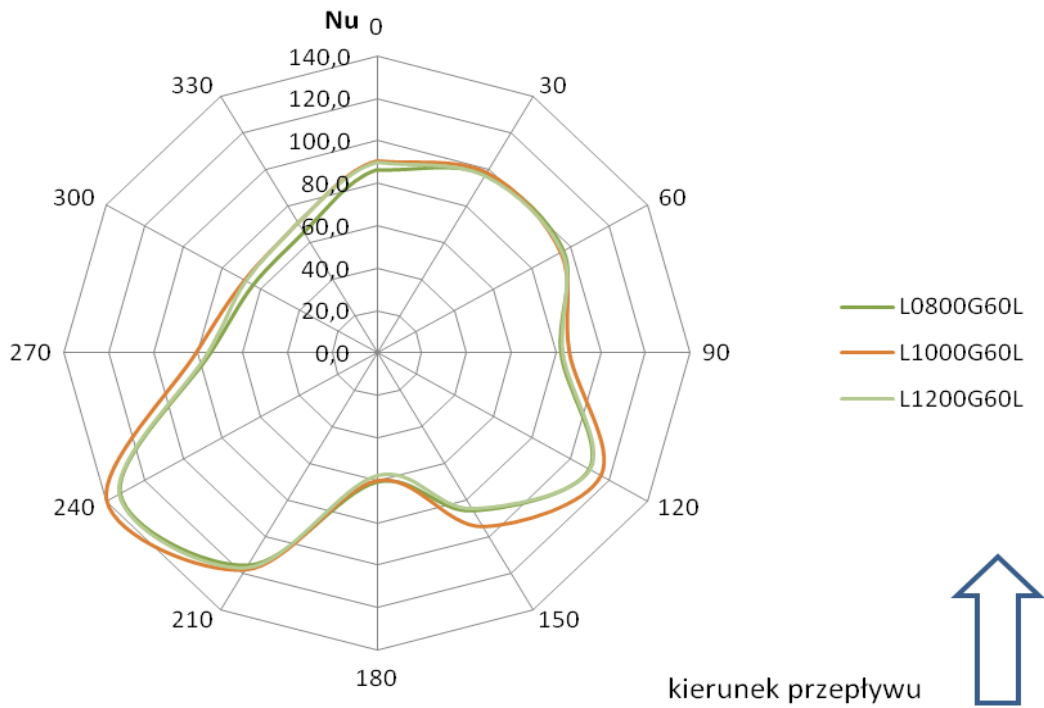
Rysunek 11-3. Wartości liczby Nusselta dla układu szeregowego i strumienia cieczy $800 \text{ dm}^3/\text{h}$ – wpływ strumienia gazu



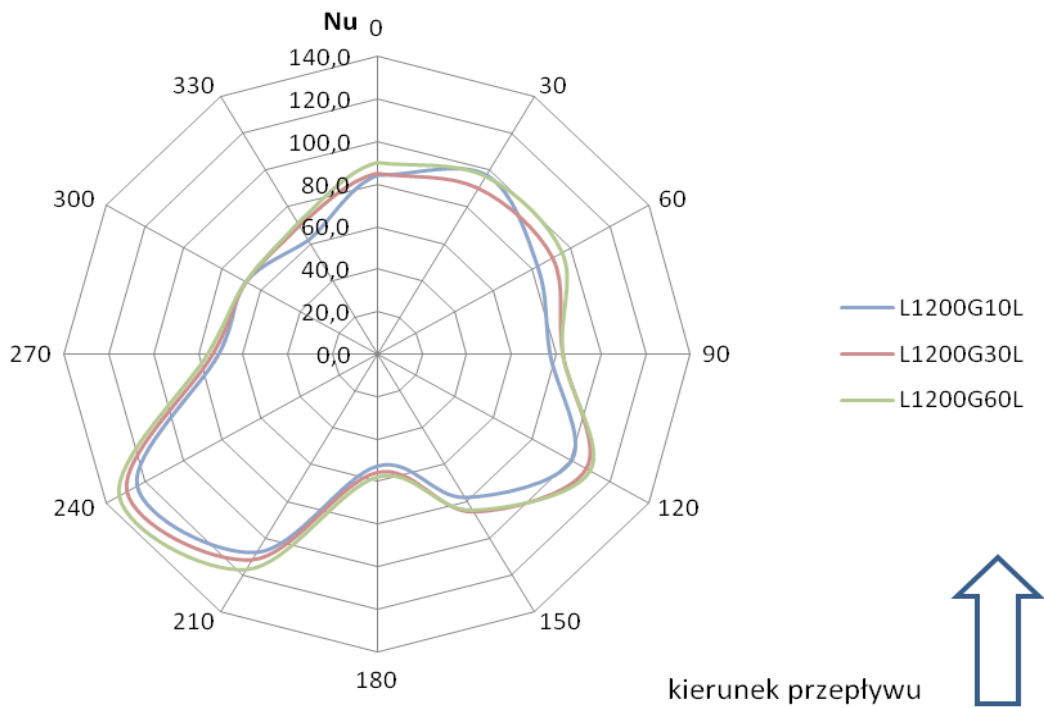
Rysunek 11-4. Wartości liczby Nusselta dla układu szeregowego i strumienia gazu $30 \text{ dm}^3/\text{h}$ – wpływ strumienia cieczy



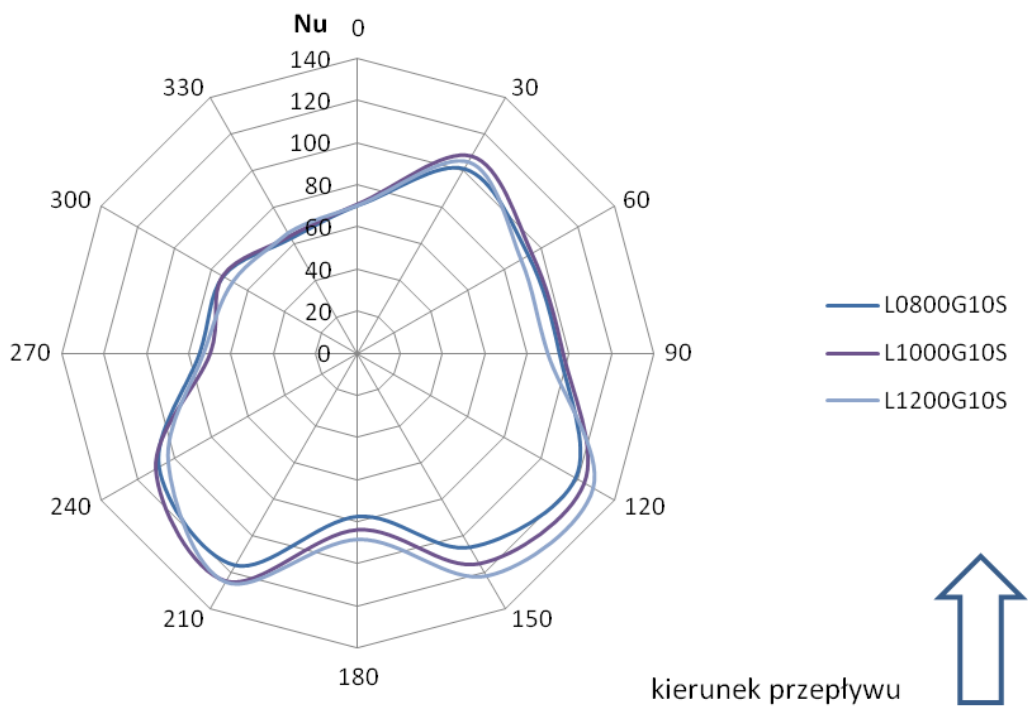
Rysunek 11-5. Wartości liczby Nusselta dla układu szeregowego i strumienia cieczy $1000 \text{ dm}^3/\text{h}$ – wpływ strumienia gazu



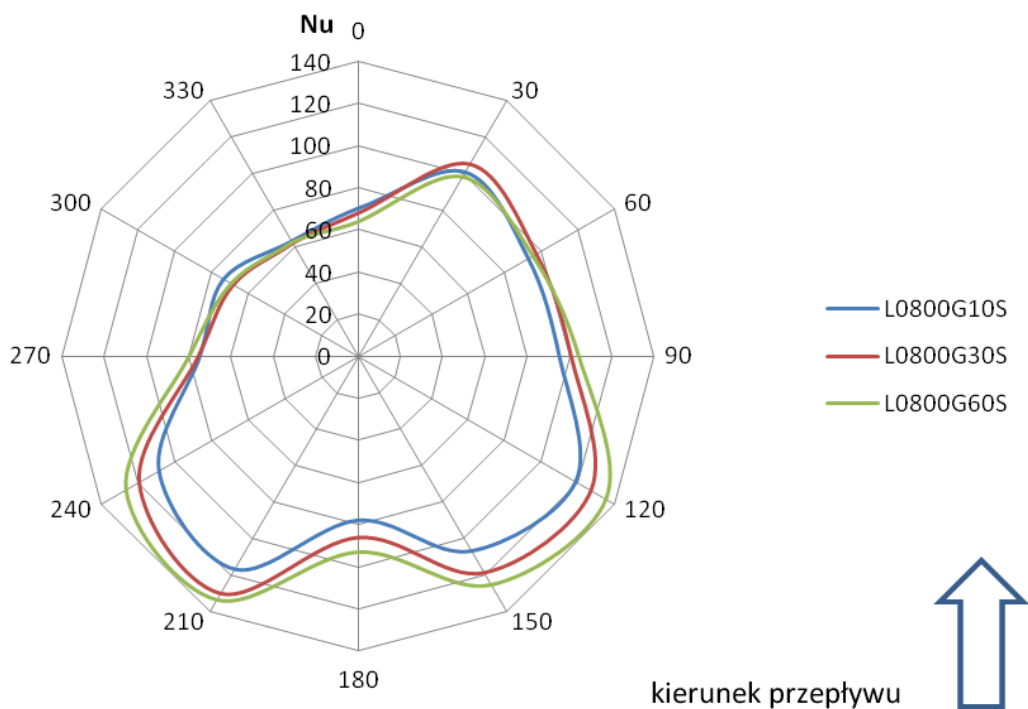
Rysunek 11-6. Wartości liczby Nusselta dla układu szeregowego i strumienia gazu 60 dm³/h – wpływ strumienia cieczy



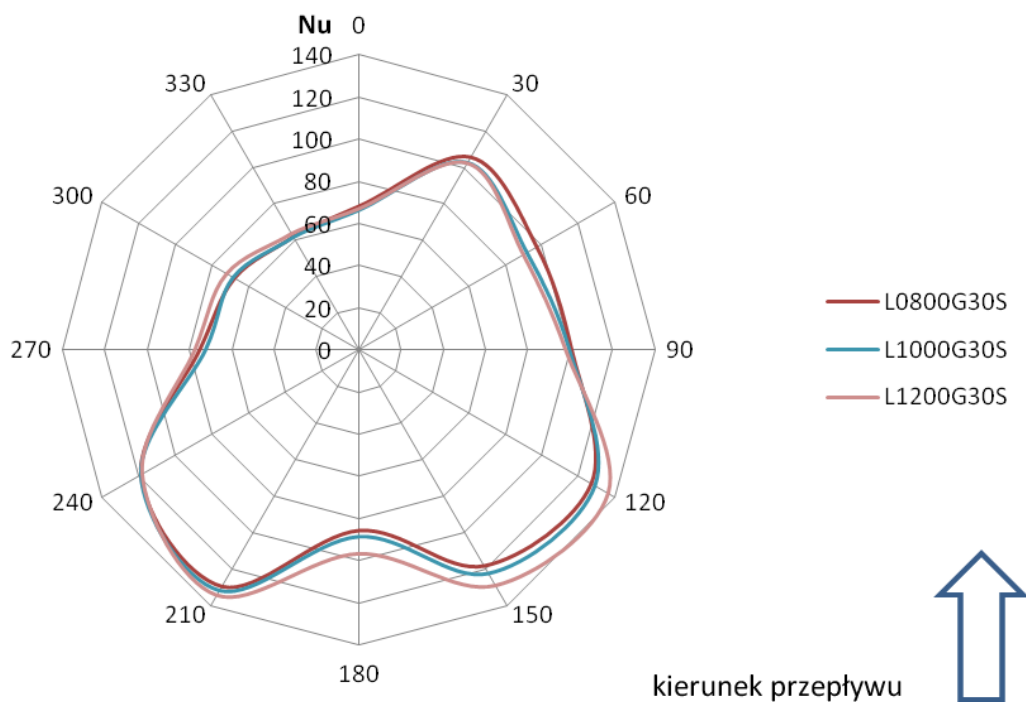
Rysunek 11-7. Wartości liczby Nusselta dla układu szeregowego i strumienia cieczy 1200 dm³/h – wpływ strumienia gazu



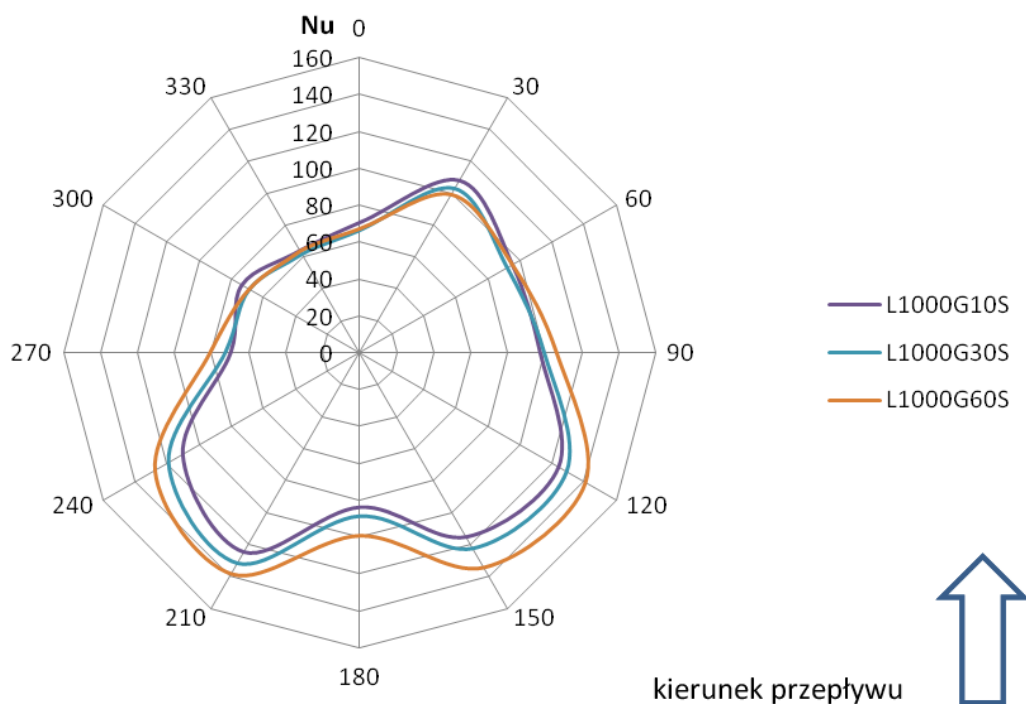
Rysunek 11-8. Wartości liczby Nusselta dla układu przestawnego i strumienia gazu 10 dm³/h – wpływ strumienia cieczy



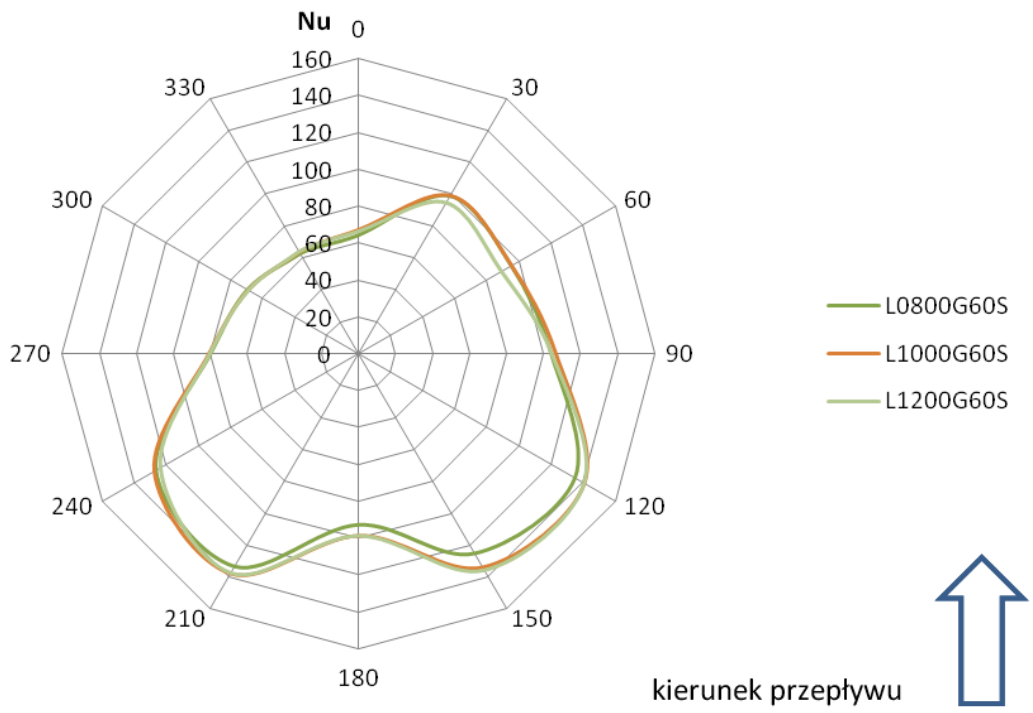
Rysunek 11-9. Wartości liczby Nusselta dla układu przestawnego i strumienia cieczy 800 dm³/h.- wpływ strumienia gazu



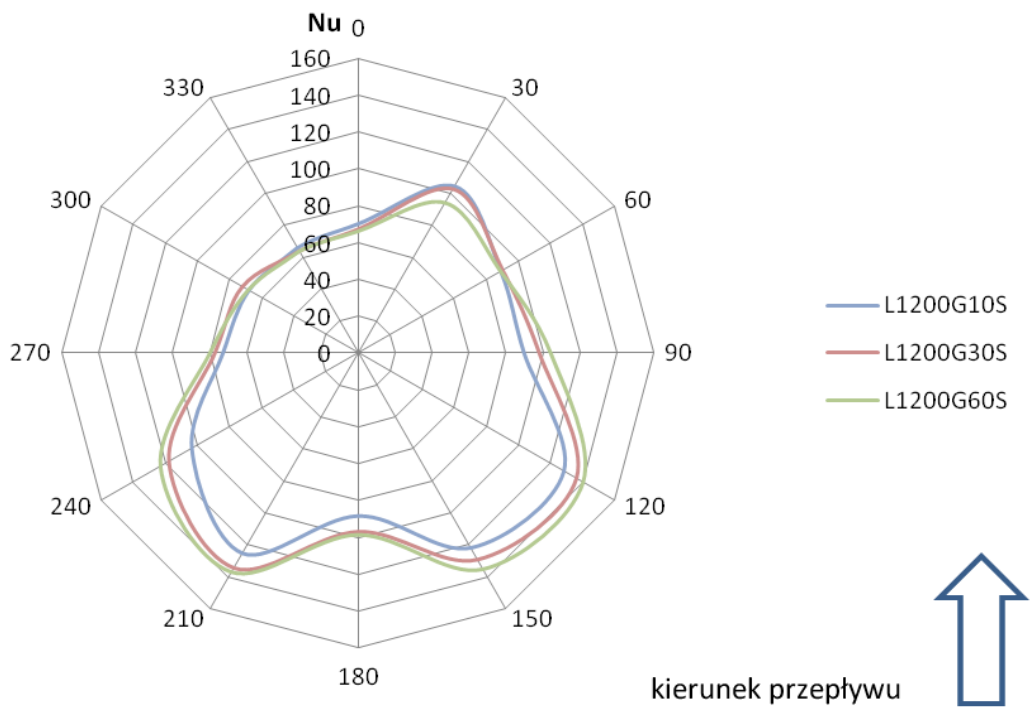
Rysunek 11-10. Wartości liczby Nusselta dla układu przestawnego i strumienia gazu $30 \text{ dm}^3/\text{h}$ – wpływ strumienia cieczy



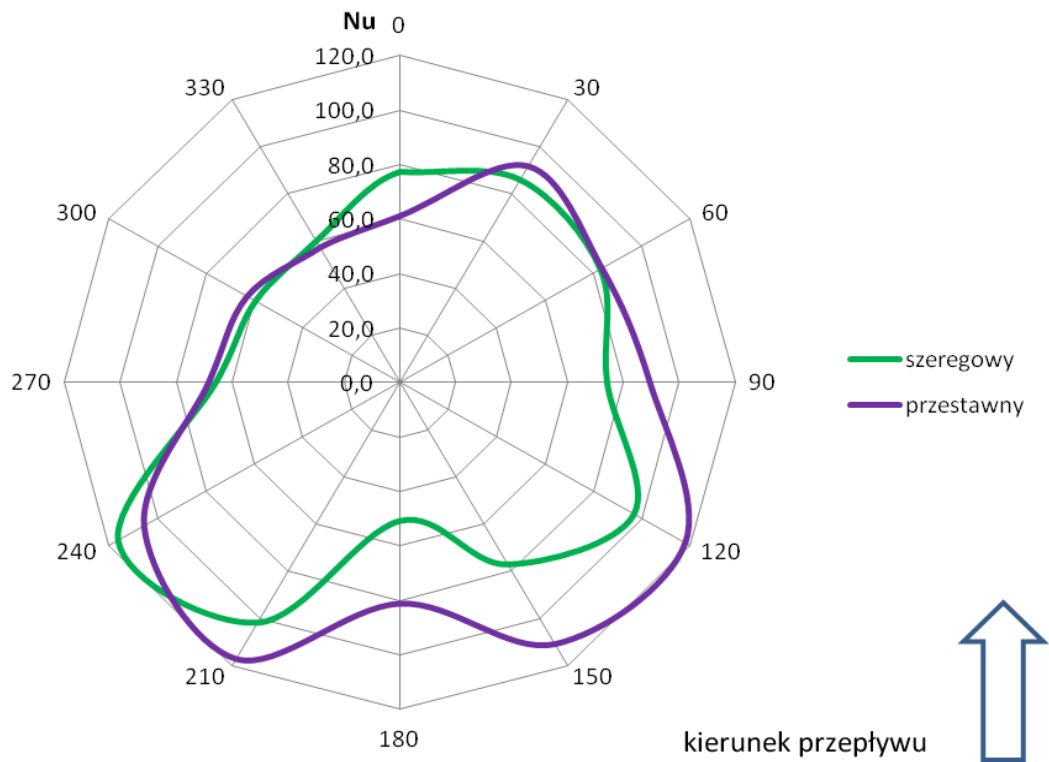
Rysunek 11-11. Wartości liczby Nusselta dla układu przestawnego i strumienia cieczy $1000 \text{ dm}^3/\text{h}$ – wpływ strumienia gazu



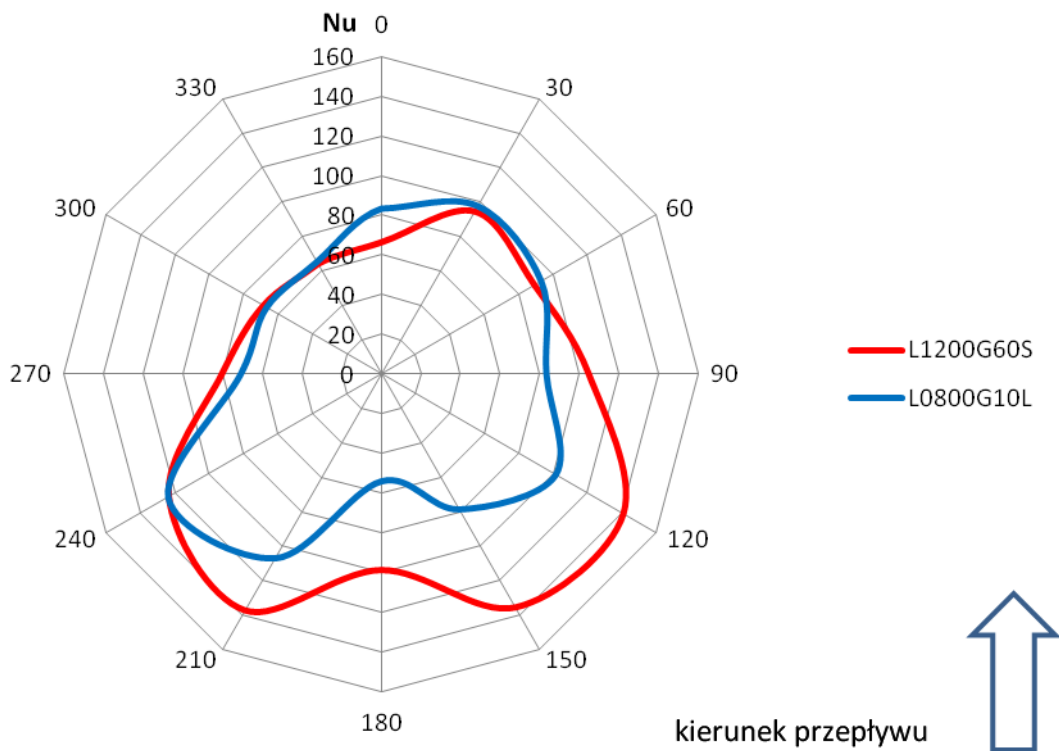
Rysunek 11-12. Wartości liczby Nusselta dla układu przestawnego i strumienia gazu 60 dm³/h – wpływ strumienia cieczy



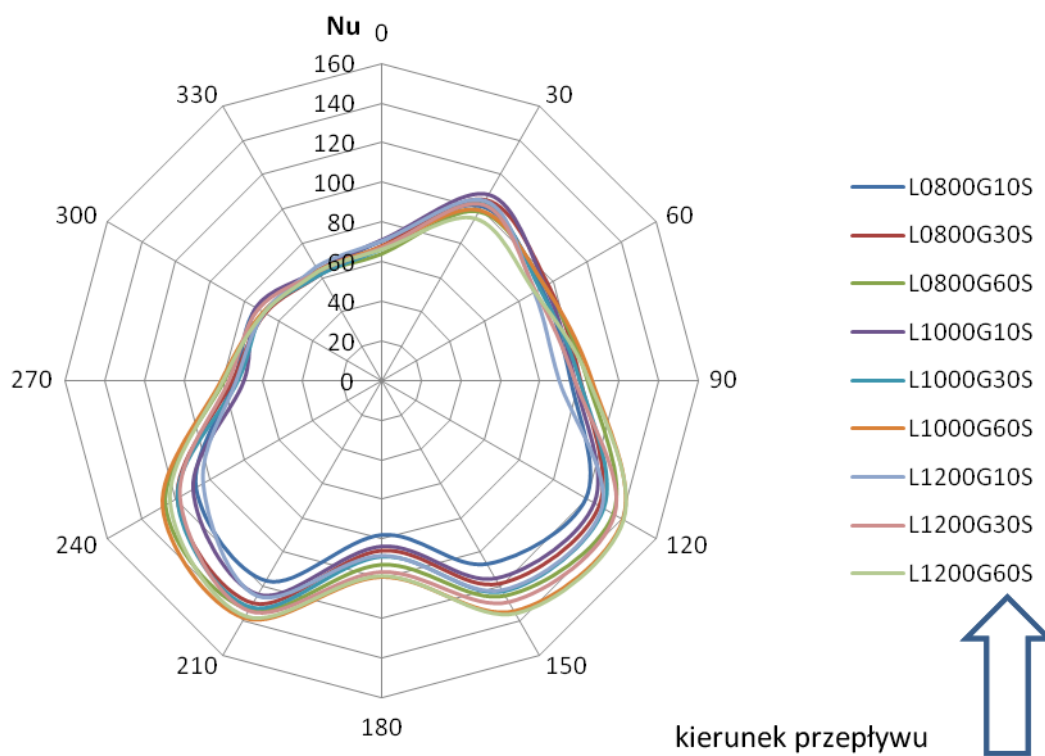
Rysunek 11-13. Wartości liczby Nusselta dla układu przestawnego i strumienia cieczy 1200 dm³/h – wpływ strumienia gazu



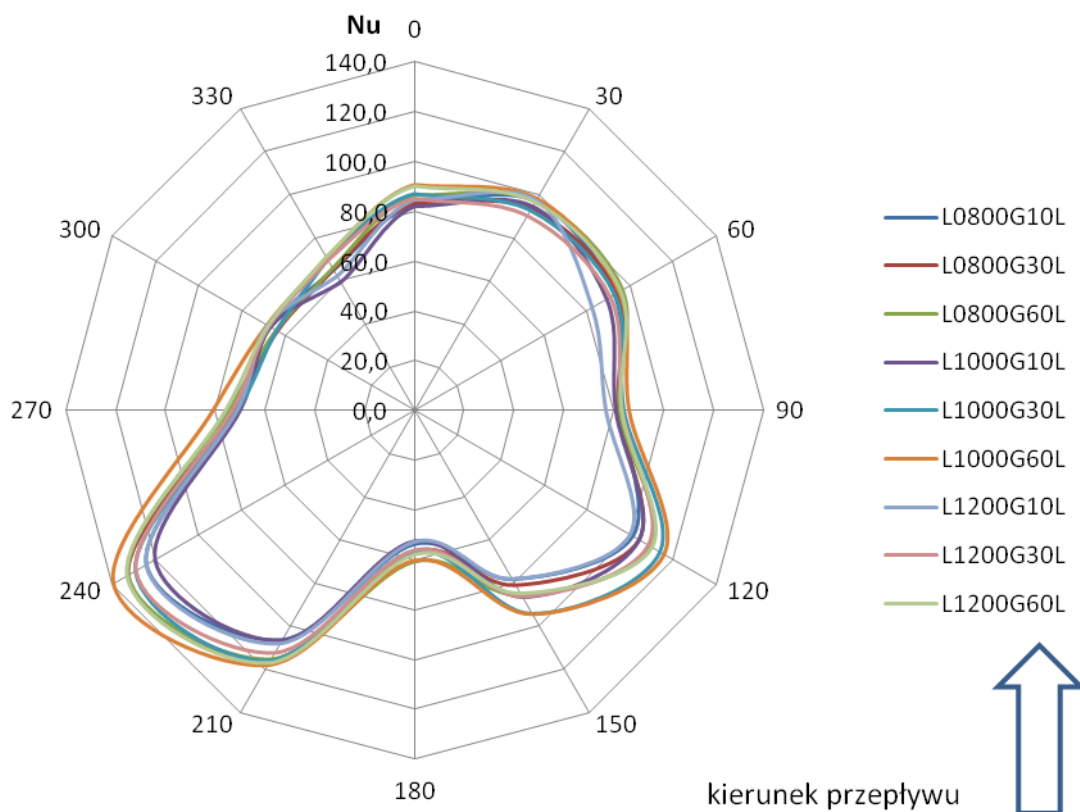
Rysunek 11-14. Średnie wartości liczby Nusselta dla układów szeregowego i przestawnego – wpływ uporządkowania rur w pęku



Rysunek 11-15. Średnie wartości liczby Nusselta dla serii pomiarowych dla których uzyskano maksymalne i minimalne wartości Nu



Rysunek 11-16. Zestawienie wartości liczby Nusselta dla układu przestawnego



Rysunek 11-17. Zestawienie wartości liczby Nusselta dla układu szeregowego

12. Analiza wyników

Połączenie w niniejszej pracy dwóch metod pomiarowych, to próba znalezienia korelacji pomiędzy wynikami uzyskanych tymi metodami. w kolejnych podrozdziałach kolejno zostaną przedstawione:

- porównanie pomiędzy wartościami średniej liczby Nusselta wyznaczonymi metodą elektrochemiczną dla przepływu mieszaniny dwufazowej z obliczonymi wg korelacji metodą VDI dla przepływu jednofazowego przez pęk rur,
- analiza pól prędkości uzyskanych metodą DPIV,
- analiza wartości liczby Nusselta wyznaczonych metodą elektrochemiczną,
- korelacje pomiędzy powyższymi wynikami.

12.1. Porównanie Nu wyznaczonych eksperymentalnie z obliczonymi.

Poniżej przedstawiono przykładowy tok obliczeniowy liczby Nusselta wg metody VDI [121] zaproponowany przez Gnielińskiego dla przepływu jednofazowego przez pęk rur. Dane dotyczą pomiaru L0800G10S, dla układu przestawnego.

Tabela 12-1. Wartości stałe do obliczeń:

Podziałka poprzeczna	S_1	25	mm
Podziałka wzdłużna ukl. przestawny	S_{2S}	21,65	mm
Średnica rur	D_o	15	mm
Lepkość dynamiczna elektrolitu	H	0,00111	[kg/(ms)]
Lepkość kinematyczna elektrolitu	N	$1,067 \cdot 10^{-6}$	[m ² /s]
Ciepło właściwe elektrolitu	C_p	4077	[J/kgK]
Współczynnik przewodzenia ciepła elektrolitu	λ	0,5836	[W/mK]
Rząd rur w którym umieszczono elektrodę	n_R	3	szt
pole powierzchni przekroju pęku rur	F_{min}	0,0263	m ²

Stosunki podziałek do średnic wyznaczono:

$$a = \frac{s_1}{d_0} = \frac{25}{15} = 1,67$$

$$b_s = \frac{s_2}{d_0} = \frac{21,65}{15} = 1,44$$

Pole powierzchni przestrzeni międzyrurowych badanego modelu wynosi:

$$F_{min} = 0,00263 \text{ m}^2$$

Do obliczeń przyjęto średnią prędkość pozorną przepływu mieszaniny dwufazowej:

$$w = \frac{\dot{V}_L + \dot{V}_G}{F_{min}} = \frac{2,25 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,0263 \text{ m}^2} = 0,086 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Długość charakterystyczną do obliczenia liczby Reynoldsa wyznaczono z równania:

$$l = \frac{\pi}{2} d_0 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{15 \text{ mm}}{1000} = 0,0235 \text{ m}$$

Liczba Reynoldsa

$$Re = \frac{wl}{\nu} = \frac{0,086 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,0235 \text{ m}}{1,067 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 1889$$

Liczba Prandtla

$$Pr = \frac{c_p \eta}{\lambda} = \frac{4077 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \times 0,00111 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}}{0,5836 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}} = 7,754$$

Liczba Nusselta dla przepływu laminarnego:

$$Nu_{lam} = 0,664 \sqrt{Re} \sqrt[3]{Pr} = 0,664 \cdot \sqrt{1889} \cdot \sqrt[3]{7,754} = 57$$

W związku z niską wartością liczby Reynoldsa pominięto wpływ przepływu burzliwego, w związku z czym można założyć, że:

$$Nu_{l,0} = Nu_{lam} = 57$$

Współczynnik udziału stref stagnacji wyliczono:

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4a} = 1 - \frac{\pi}{4 \cdot 1,667} = 0,529$$

Obliczenie współczynnika $f_{A,S}$ dla układu przestawnego

$$f_{A,S} = 1 + \frac{2}{3b} = 1 + \frac{2}{3 \cdot 1,443} = 1,96$$

Liczba Nusselta dla przestawnego pęku rur wynosi:

$$Nu_{0,bundle,S} = \frac{1 + (n - 1)f_{A,stag}}{n} Nu_{l,0} = \frac{1 + (3 - 1) \cdot 1,96}{3} \cdot 57 = 94$$

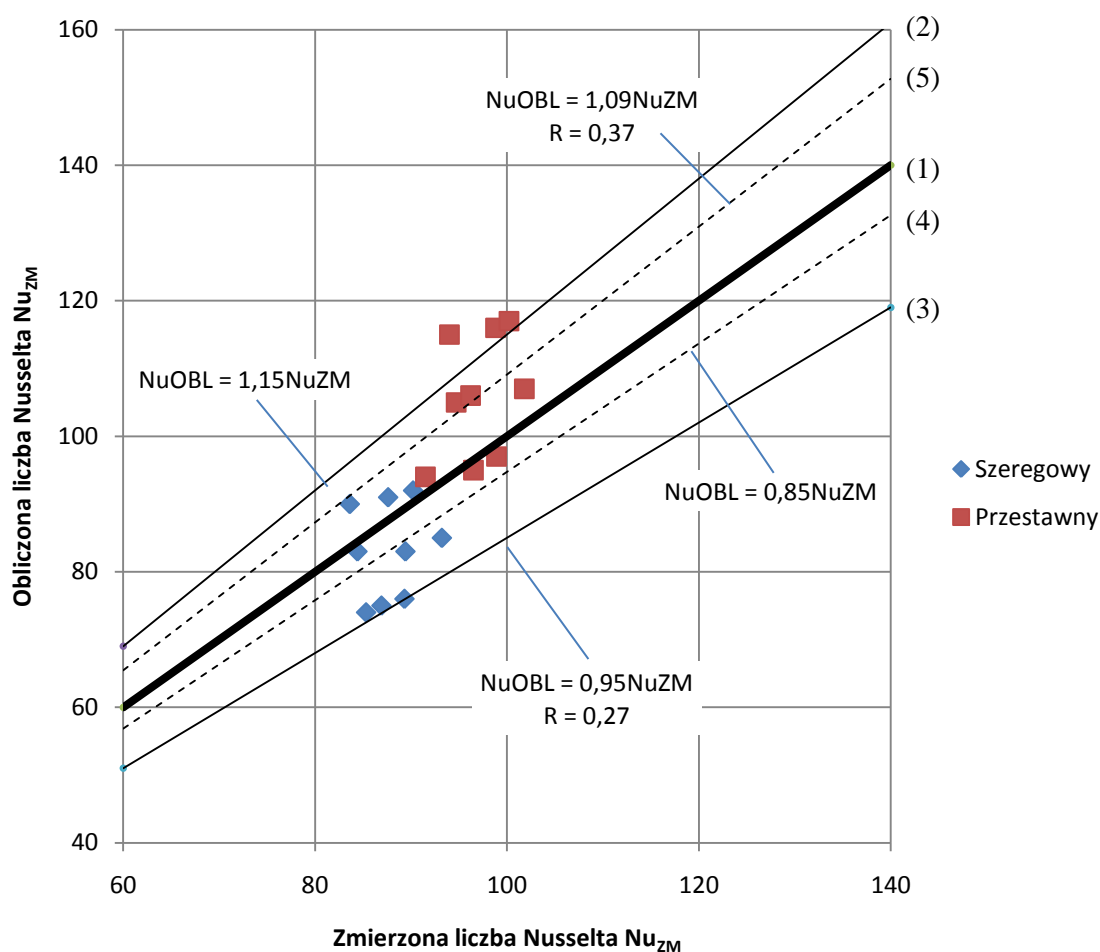
Analogiczne obliczenia przeprowadzono dla wszystkich serii pomiarowych, a wyniki zestawiono z wartościami liczby Nusselta otrzymanymi z pomiarów metodą elektrochemiczną. Zestawienie to przedstawia tabela 12-2.

Tabela 12-2. Zestawienie wartości liczb Nusselta wyliczonych metodą VDI, oraz elektrochemiczną

Nazwa serii	układ	Strumień mieszanki	prędkość pozorna	Re	Nu _{OBL}	Nu _{ZM}
		[m ³ /s]	[m/s]			
L0800G10L	szeregowy	0,000225	0,086	1889	74	85
L0800G30L		0,000231	0,088	1936	75	87
L0800G60L		0,000239	0,091	2006	76	89
L1000G10L		0,000281	0,107	2356	83	84
L1000G30L		0,000286	0,109	2402	83	89
L1000G60L		0,000294	0,112	2472	85	93
L1200G10L		0,000336	0,128	2822	90	84
L1200G30L		0,000342	0,130	2869	91	88
L1200G60L		0,000350	0,133	2939	92	90
L0800G10S	przestawny	0,000225	0,086	1889	94	91
L0800G30S		0,000231	0,088	1936	95	96
L0800G60S		0,000239	0,091	2006	97	99
L1000G10S		0,000281	0,107	2356	105	95
L1000G30S		0,000286	0,109	2402	106	96
L1000G60S		0,000294	0,112	2472	107	102
L1200G10S		0,000336	0,128	2822	115	94
L1200G30S		0,000342	0,130	2869	116	99
L1200G60S		0,000350	0,133	2939	117	100

Wyznaczono średnie odchylenie dla wyników dla pęku szeregowego i przestawnego, wynosi ono odpowiednio 9,4% dla układu szeregowego i 12,2% dla układu przestawnego.

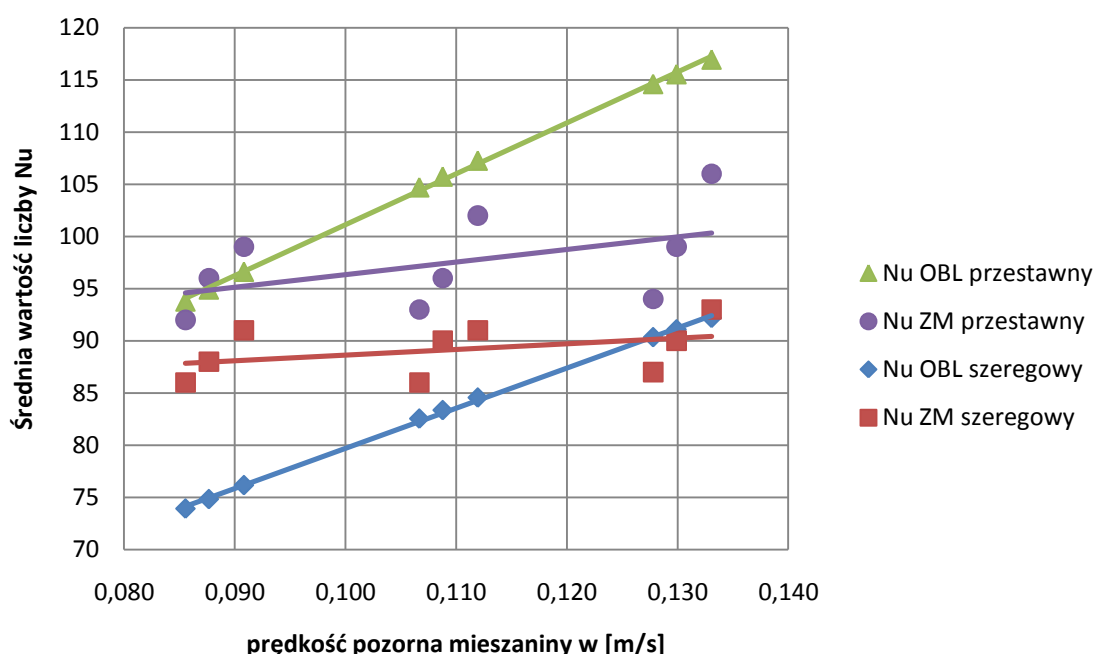
Rysunek 12-1 przedstawia porównanie wartości średniej liczby Nu zmierzonych metodą elektrochemiczną oraz obliczonych metodą VDI. Zarówno dla układu przestawnego jak i szeregowego punkty leżą blisko przekątnej układu co świadczy o stosunkowo dobrej zgodności. Prawie wszystkie punkty leżą w obszarze $\pm 15\%$. Korelacja wyników pomiarów odrębnie dla sposobu uporządkowania rur wskazuje także dobrą zgodność. Dla układu szeregowego jest przeciętnie o 5,3% mniejsza, zaś przestawnego odpowiednio o 9,1% większa niż wartości obliczone, ale uzyskane współczynniki korelacji są bardzo niskie.



Rysunek 12-1. Porównanie liczb Nusselta zmierzonej i obliczonej dla układu szeregowego i przestawnego

- (1) – przekątna układu
- (2) – +15%
- (3) – - 15%
- (4) – korelacja dla szeregowego pęku rur
- (5) – korelacja dla przestawnego pęku rur

Jednak bliższa analiza uzyskanych wyników wskazuje, że trend związany ze zmianą strumieni zarówno cieczy jak i gazu jest znacznie odchylony od przekątnej układu współrzędnych. Rysunek 12-2 przedstawia wykres na którym widać wyraźnie, że metoda VDI raczej nie powinna być stosowana do obliczania wymiany ciepła dla przepływu mieszaniny dwufazowej przez pęk rur, przy wykorzystaniu wartości prędkości mieszaniny dwufazowej jako sumy prędkości pozornych. Trend wynikający z dozowania gazu do cieczy jest zupełnie inny. Trend wzrostu obliczonych wartości Nu jest bardziej dynamiczny niż wartości zmierzonych, co przy ekstrapolacji poza obszar badany będzie prowadzić do większych błędów.



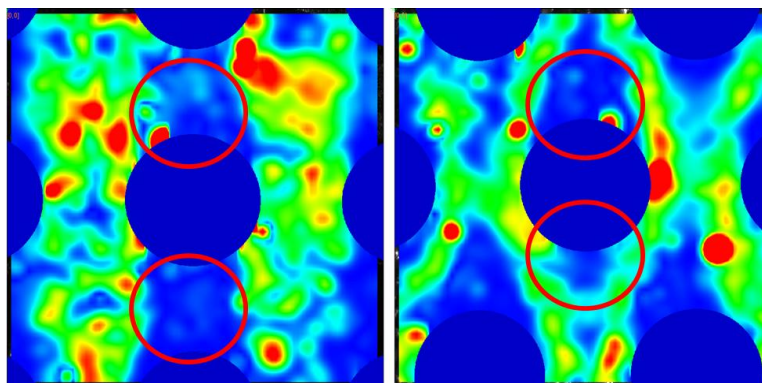
Rysunek 12-2. Zestawienie wyliczonych i zmierzonych wartości liczby Nusselta w zależności od prędkości pozornej mieszaniny dwufazowej

12.2. Analiza wyników – Metoda DPIV

Pola prędkości dla obszaru wokół pojedynczych rur wykazują dla tego samego uporządkowania rur w pęku duże podobieństwo w charakterze przepływu dla wszystkich wartości strumieni przepływu. Zaobserwowano lokalnie różne struktury wirowe, pojedyncze, w parach, symetryczne i niesymetryczne.

Cechą charakterystyczną przepływu wokół rur są strefy stagnacji występujące bezpośrednio za rurkami. w strefach tych prędkość przepływu jest znacznie niższa niż w pozostałych obszarach. Wizualizacja przepływu dwufazowego w przestrzeni międzyrurowej umożliwiła

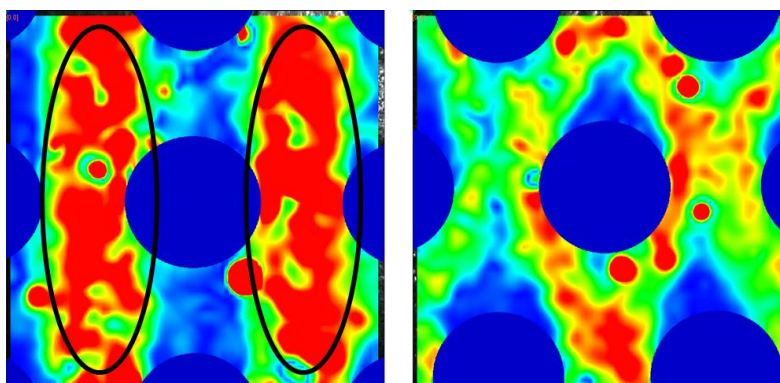
ocenę powierzchni stref stagnacji. Już wstępna analiza wyników wskazuje, że dla przepływu dwufazowego wielkość stref stagnacji jest zmienna. Dotychczas dla przepływu jednofazowego w pęku rur wielkości tych stref były wyłącznie funkcją geometrii; mowa o tym metodzie VDI opisanej w rozdziale 9.



Rysunek 12-3. Porównanie powierzchni i rozkładu stref stagnacji dla układów rur szeregowego i przestawnego

Na podstawie określenia wielkości stref stagnacji, można przyjąć że są one miarą niejednorodności przepływu w zależności od udziałów objętościowych poszczególnych faz. Rysunek 12-3 przedstawia przykład wielkości i rozmieszczenia stref stagnacji.

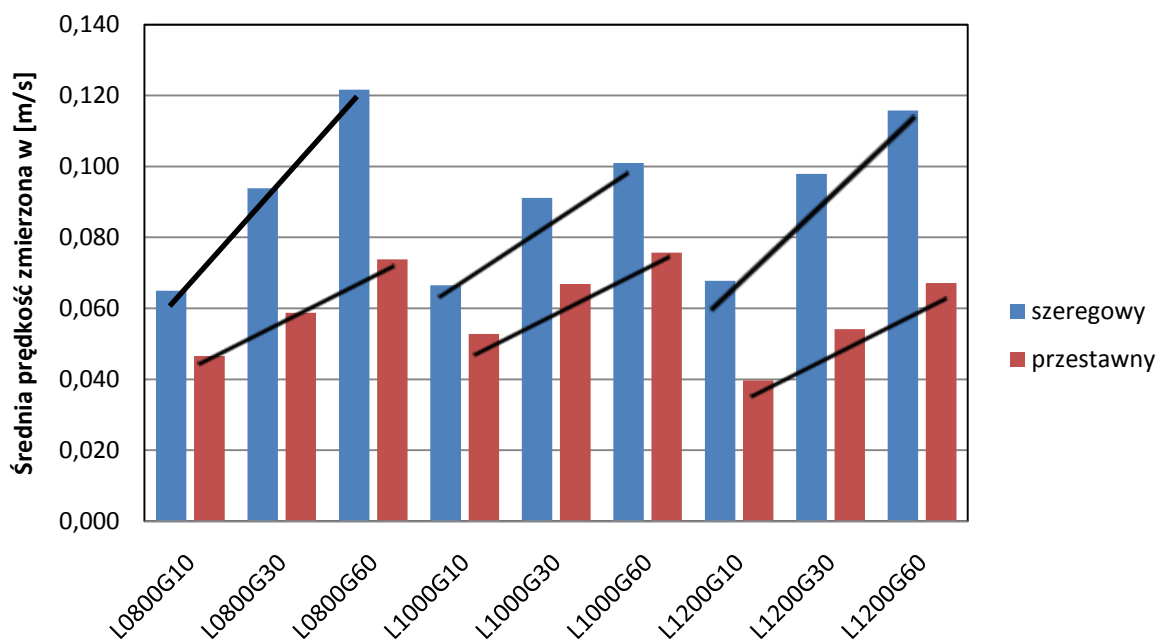
Zaobserwowano że strefy te miały znacznie większą powierzchnię dla szeregowego niż przestawnego pęku rur; największe różnice zaobserwowano dla wyższych wartości strumienia przepływu, oraz w obszarach położonych przed rurkami. Zaobserwowano także spadek wielkości stref stagnacji wraz ze wzrostem strumienia przepływającego gazu. Przy wzroście strumienia cieczy, zjawisko to nie było już tak wyraźne. Stwierdzono też że powierzchnia stref stagnacji jest nieregularna i jej kształt zmienia się dynamicznie.



Rysunek 12-4. Porównanie rozkładu pola prędkości dla układów rur szeregowego i przestawnego

Układ szeregowy charakteryzował się większymi prędkościami w szczelinach międzyrurowych, natomiast układ przestawny cechowała większa równomierność rozkładu prędkości na powierzchni pola co przedstawiono na rysunku 12-4.

Rysunek 12-5 przedstawia wykres średnich prędkości przepływu z wszystkich pomiarów DPIV. Widać na nim, że większe średnie prędkości przy przepływie wznoszącym występują w szeregowym układzie rur. Można to tłumaczyć dłuższą drogą jaką pokonuje struga dwufazowa w przestawnym pęku rur, gdzie ruch strugi nie jest prostoliniowy. Dla szeregowego pęku rur struga płynie liniowo w szczelinie wzdłużnej między rurami, nieznacznie tylko poruszając się w wolnych strefach. Przez to że pęcherze nie napotykają na swojej drodze żadnych przeszkód, prędkość ich wznoszenia się może być wyższa niż w przypadku układu przestawnego. Można też zauważyć, że zwiększanie strumienia fazy gazowej ma większy wpływ na prędkość przepływu dwufazowego niż zwiększanie fazy ciekłej.

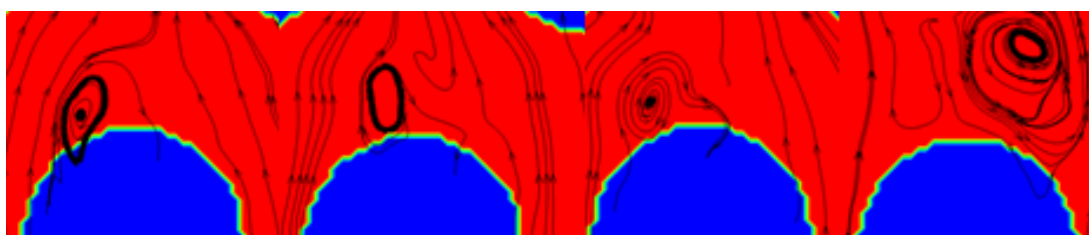


Rysunek 12-5. Zestawienie średnich prędkości przepływu wyznaczonych techniką DPIV

Na podstawie wyników badań, w oparciu o technikę PIV można stwierdzić, że hydrodynamika przepływu dwufazowego gaz-ciecz w przestrzeni międzyrurowej charakteryzuje się znaczną niejednorodnością. Ocena tej niejednorodności może być punktem wyjścia do badań związanych z wpływem na intensywność wymiany ciepła / masy w płaszczowo-rurowym wymienniku ciepła.

Zastosowanie techniki DPIV, oraz stworzone za jej pomocą pola prędkości przepływu pozwoliły na ocenę jednorodności rozkładu prędkości i jej zmianę w przy różnych parametrach przepływu dla dwóch sposobów uporządkowania rur w pęku. Szeregowy pęk rur charakteryzował się znacznie większą nierównomiernością w porównaniu do przestawnego. Pęcherze wznoszące się pomiędzy rurami nie napotykały na żadne przeszkody przez co osiągały wyższe prędkości przepływu. Dla układu przestawnego średnie i maksymalne prędkości były wyraźnie niższe.

Dzięki wyznaczeniu linii prądu zaobserwowano powstawanie, łączenie i zanikanie różnych struktur wirowych. Niezależnie od układu rur występowały one najczęściej w obszarach tuż za rurkami. Nie zaobserwowano żadnej zależności pomiędzy udziałem poszczególnych faz a częstotliwością występowania struktur wirowych, których przykład przedstawia rysunek 12-6.

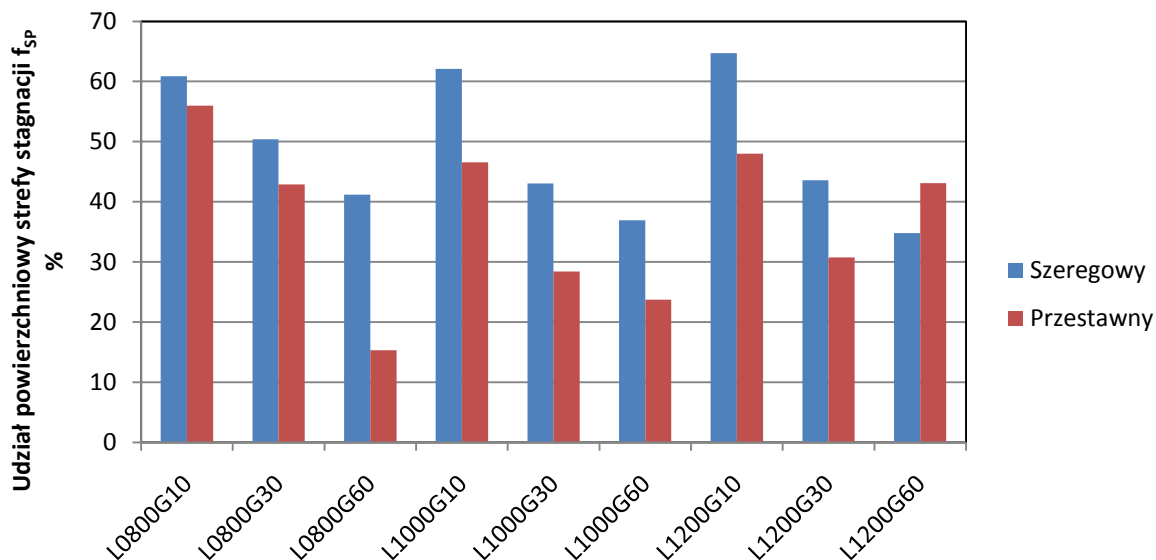


Rysunek 12-6. Przykład zaobserwowanych struktur wirowych

Zaobserwowano że dla przepływu w układzie szeregowym główne strumienie przepływały głównie w szczelinach pomiędzy rurami, przez co ich udział w globalnej wymianie ciepła może być mniejszy. w przypadku układu przestawnego strumień omywa rurki na dłuższej drodze. Oderwanie głównego strumienia od rurki wpływało to także na powstawanie stref zawirowania za rurkami, dla układu szeregowego strefy te są większe.

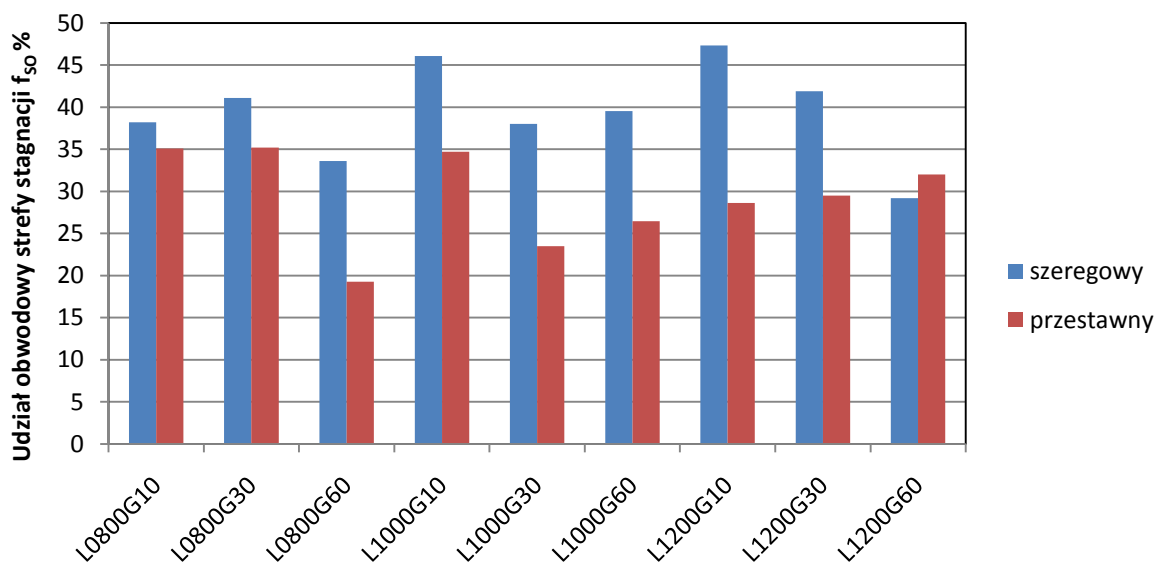
Biorąc pod uwagę, że przepływ to proces przestrzenny, wymiana ciepła dotyczy powierzchni rur, zdecydowano się określić wartości stref stagnacji na dwa sposoby: powierzchnia stref stagnacji w kontrolnym obszarze, oraz wielkość obwodu rury w strefie występowania strefy stagnacji. Rysunek 12-7 przedstawia zestawienie procentowego udziału powierzchniowych stref stagnacji dla obydwu badanych układów, liczonych według procedury opisanej w rozdziale 10. Zaobserwowano wyraźny spadek wielkości powierzchni stref stagnacji wraz ze wzrostem strumienia przepływającego gazu. Przy wzroście strumienia cieczy, zjawisko to nie było już tak wyraźne. Podczas wizualnej oceny uzyskanych obrazów stwierdzono też że powierzchnia stref stagnacji jest nieregularna i jej kształt zmienia się dynamicznie.

Co jednak istotne stwierdzono, że dla małego dozowania gazu wartość tref stagnacji jest praktycznie zgodna z wartościami dla przepływu płynu jednofazowego obliczonymi według metody VDI [121], gdzie parametr ψ wynosi 53,9%



Rysunek 12-7. Udział procentowy pola powierzchni stref stagnacji w badanym obszarze.

Dokonano również analizy powierzchni styku stref stagnacji z rurką liczonej jako udział procentowy w stosunku do całego obwodu rurki. Również w tym przypadku układ szeregowy charakteryzował się wyższymi wartościami styku strefy stagnacji z rurką. Zestawienie wyników przedstawia rysunek 12-8.

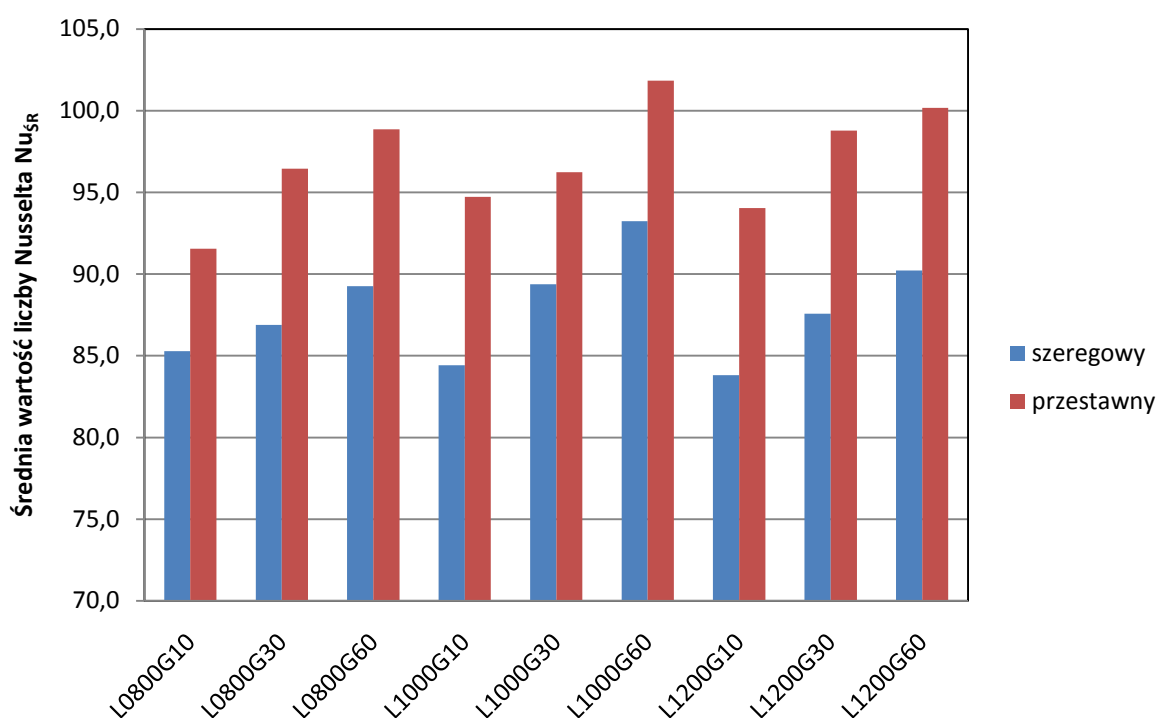


Rysunek 12-8. Udział procentowy styku stref stagnacji na obwodzie rury.

12.3. Analiza wyników – metoda Elektrochemiczna

Na podstawie wykresów rozkładu lokalnych wartości liczb Nusselta będących bezwymiarowym odpowiednikiem współczynnika ciepła dokonano oceny globalnej wymiany ciepła na powierzchni pęków rur modelowego wymiennika ciepła.

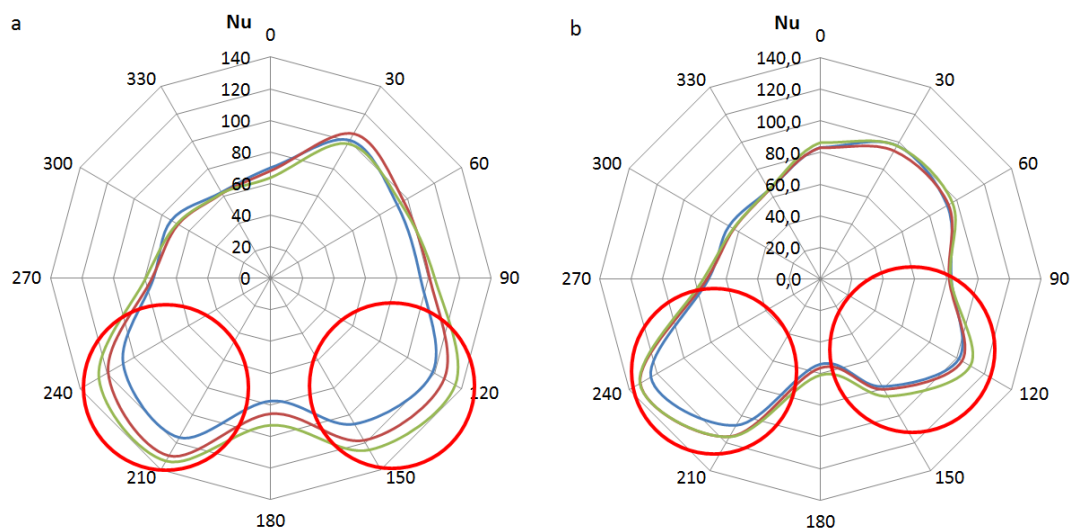
Przeprowadzono analizę wpływu zmian strumieni poszczególnych faz: ciekłej i gazowej, oraz rodzaju układu rur: przestawnego i szeregowego, na intensywność wymiany ciepła. Wyniki pokazały że dla przepływu dwufazowego geometria układu rur zastosowanego do budowy wymiennika ciepła ma znaczny wpływ na intensywność wymiany ciepła, reprezentowanej przez wartości średnie liczby Nusselta.



Rysunek 12-9. Porównanie wyników badań dla układów szeregowego i przestawnego.

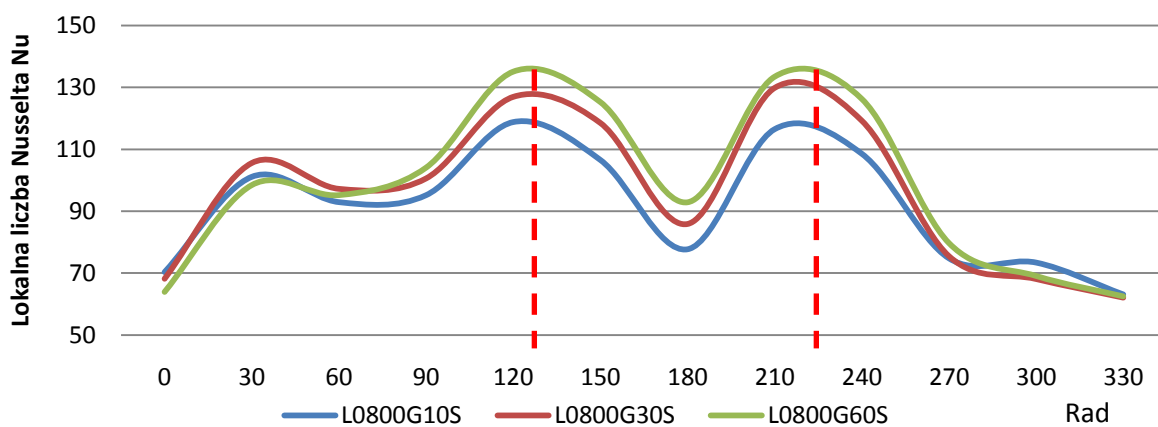
Porównując bezpośrednio wyniki wszystkich pomiarów dla układów szeregowego i przestawnego, o tym samym stosunku $t/d=1,66$ stwierdzono, że układ przestawny był o ponad 10% bardziej wydajny niż układ szeregowy. Rysunek 12-9 przedstawia porównanie średnich wartości liczb Nusselta mierzonych na całym obwodzie rur dla układu szeregowego i przestawnego.

Analizując rozkład liczby Nusselta wokół rury (rysunek 12-10) można zauważyć, że w czołowej części rur w okolicach kątów 135° i 225° , gdzie strumień mieszaniny dwufazowej intensywnie napływał na powierzchnię rur, lokalne wartości liczb Nusselta przybierały największe wartości.



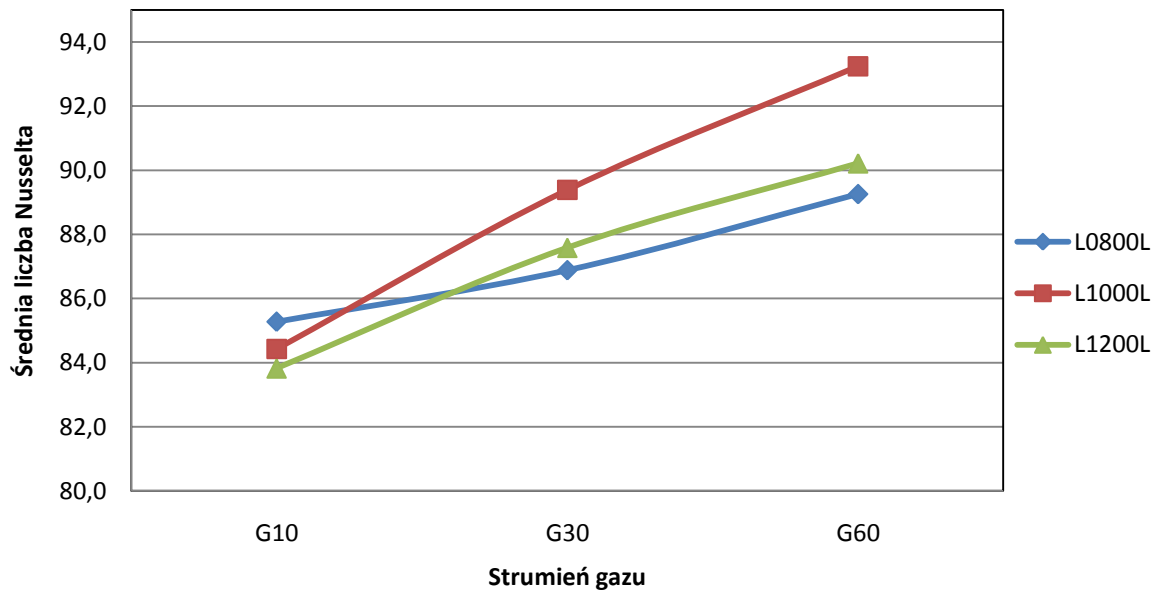
Rysunek 12-10 Lokalne maksima liczb Nusselta a) układ przestawny, b) układ szeregowy

Zależność tą zaobserwowano dla wszystkich pomiarów i w obydwu pękach rur. W przypadku przestawnego pędu nierównomierność ta była mniejsza niż w przypadku pędu szeregowego. Również w okolicach stopni 135 i 225 zaobserwowano największy wpływ zmian parametrów przepływu na wartości liczb Nusselta. Najmniejsze zmiany tej wartości wystąpiły za rurką (rysunek 12-11). Nierównomierności rozkładu Nu na obwodzie malały ze wzrostem strumieni gazu i cieczy.

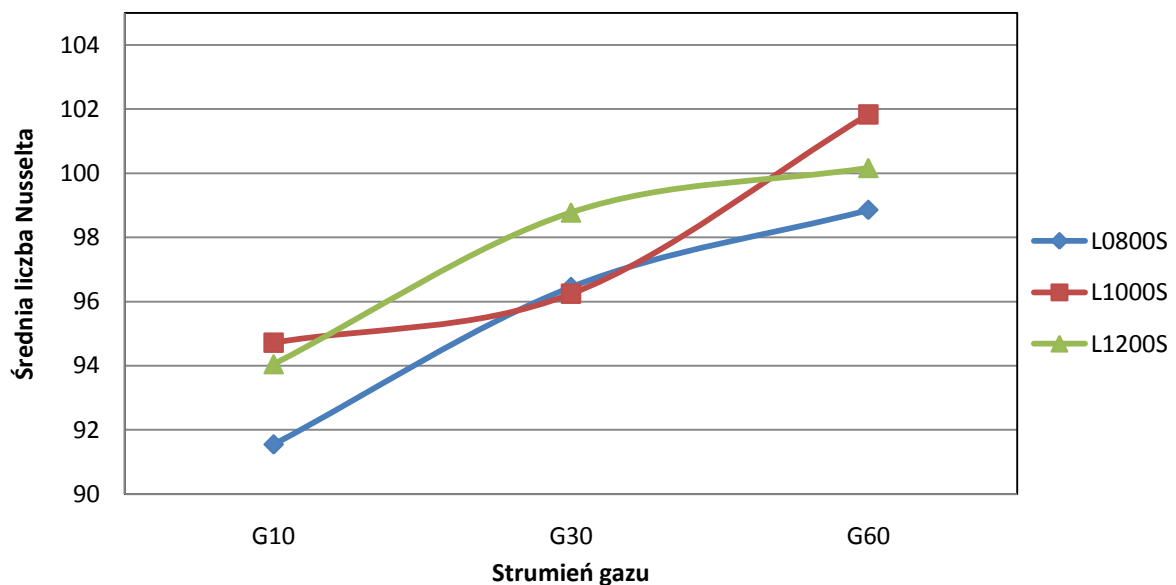


Rysunek 12-11. zmiana wartości Nu przy wzroście strumienia fazy gazowej dla stałego strumienia cieczy o wartości $800\text{dm}^3/\text{h}$

Zauważono duży wpływ zmiany strumienia fazy gazowej na wartości liczb Nusselta. Tworzące się struktury przepływu, wznoszące się pęcherze, które zaburzają dystrybucję faz, mają zatem wpływ na proces wymiany ciepła. Na rysunku 12-12 i 12-13 przedstawiono jak zmieniają się wartości liczby Nusselta przy wzroście strumienia fazy gazowej.



Rysunek 12-12. Zmiany wartości Nu przy wzroście strumienia gazu dla szeregowego układu rur



Rysunek 12-13. Zmiany wartości Nu przy wzroście strumienia gazu dla przestawnego układu rur

Wynika z tego, że nawet niewielki strumień fazy gazowej ma duży wpływ na wymianę ciepła, a zatem nie powinno się upraszczać obliczeń doborów wymienników ciepła i stosować modele jednofazowe, do obliczeń dla układów dwufazowych.

W celu oceny stopnia nierównomierności rozkładu liczby Nusselta na obwodzie rurki, zaproponowano obliczenie średniej i maksymalnej asymetrii oznaczonych jako $f_{Nu\ max}$, czyli stosunek maksymalnego odchylenia wartości σ_{max} do wartości średniej, oraz $f_{Nu\ \acute{s}r}$, określone jako stosunek odchylenia średniokwadratowego $\sigma_{\acute{s}r}$ do wartości średniej Nu , wyrażone zależnościami:

$$f_{Nu\ max} = \frac{\sigma_{max}}{Nu_{\acute{s}r}} \cdot 100\% \quad (12-1)$$

$$f_{Nu\ \acute{s}r} = \frac{\sigma_{\acute{s}r}}{Nu_{\acute{s}r}} \cdot 100\% \quad (12-2)$$

Maksymalne i średniokwadratowe odchylenie wartości liczby Nusselta z pomiarów na 12 punktach pomiarowych umieszczonych na obwodzie rurki oblicza się z zależności:

$$\sigma_{max} = MAX|Nu_i - Nu_{\acute{s}r}| \quad (12-3)$$

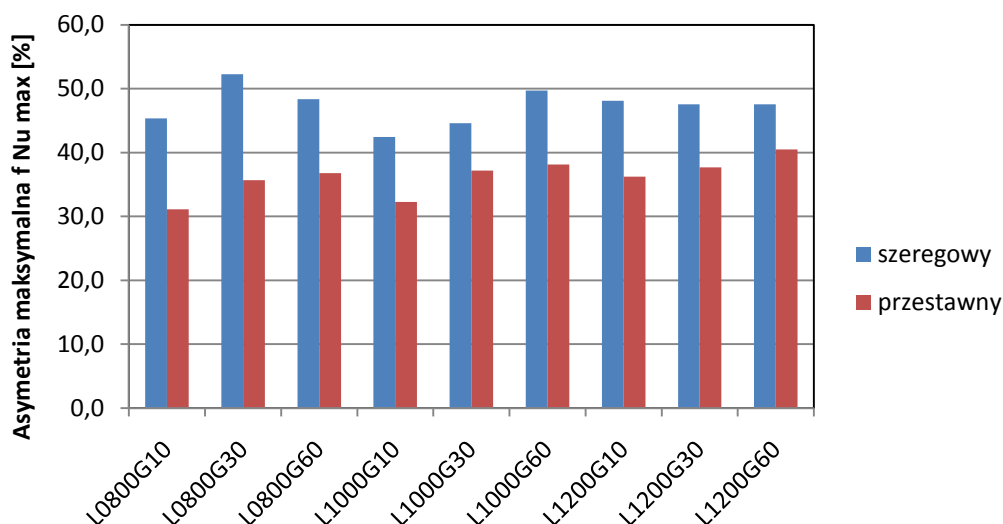
$$\sigma_{\acute{s}r} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} (Nu_i - Nu_{\acute{s}r})^2}{12}} \quad (12-4)$$

Wyniki obliczeń przedstawia tabela 12-3.

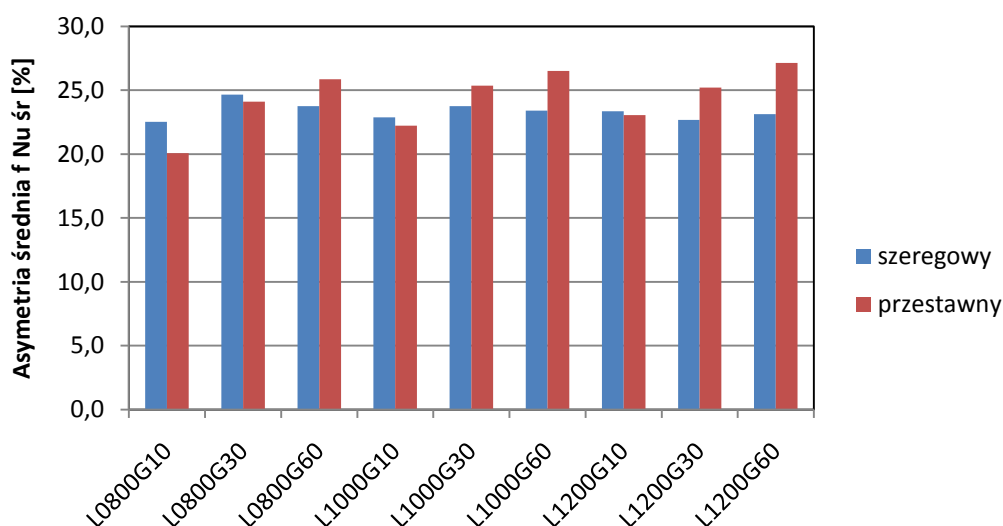
Tabela 12-3. Wartości średniej i maksymalnej asymetrii rozkładu Nu na obwodzie rurki

Układ szeregowy			Układ przestawny		
Nazwa serii	$f_{Nu\ max}$	$f_{Nu\ \acute{s}r}$	Nazwa serii	$f_{Nu\ max}$	$f_{Nu\ \acute{s}r}$
L0800G10L	45,4	22,5	L0800G10S	31,1	20,1
L0800G30L	52,3	24,7	L0800G30S	35,7	24,1
L0800G60L	48,4	23,7	L0800G60S	36,8	25,8
L1000G10L	42,4	22,9	L1000G10S	32,3	22,2
L1000G30L	44,6	23,8	L1000G30S	37,2	25,3
L1000G60L	49,7	23,4	L1000G60S	38,1	26,5
L1200G10L	48,1	23,3	L1200G10S	36,2	23,1
L1200G30L	47,5	22,7	L1200G30S	37,7	25,2
L1200G60L	47,6	23,1	L1200G60S	40,5	27,1

Porównując wartości maksymalnej asymetrii dla obydwu badanych układów można zauważyć że układ szeregowy charakteryzował się większą asymetrią wartości liczby Nu na obwodzie rurek, co pokazuje wykres przedstawiony na rysunku 12-14. Różnice te nie są już tak wyraźne jeżeli zestawimy wartości obliczeń dla średniej asymetrii, co widać na wykresie przedstawionym na rysunku 12-15.



Rysunek 12-14. Zestawienie wartości maksymalnej asymetrii Nu dla układu szeregowego i przestawnego



Rysunek 12-15. Zestawienie wartości średniej asymetrii Nu dla układu szeregowego i przestawnego

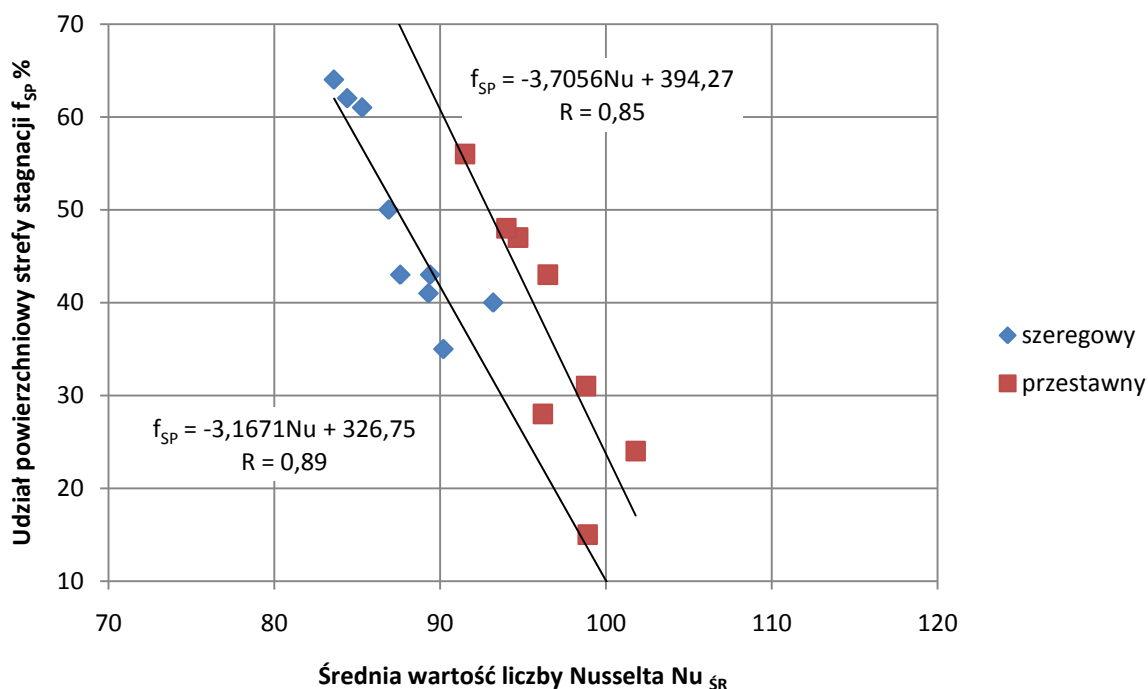
Gdy porównamy wartości asymetrii maksymalnej z wynikami średnich wartości liczby Nusselta, można stwierdzić że wielkość asymetrii wpływa na wartość średnią współczynnika wnikania ciepła, dla większych wartości asymetrii intensywność wymiany ciepła maleje.

12.4. Korelacje pomiędzy charakterem przepływu a wymianą ciepła

Szukając bezpośredniego związku pomiędzy charakterem przepływu wokół rury na intensywność wymiany ciepła na jej powierzchni, podjęto próbę korelacji wyników przedstawionych w podrozdziałach 12.2. i 12.3. w poszukiwaniu związku pomiędzy nimi.

Po przeprowadzonej analizie dla różnych zaproponowanych parametrów stwierdzono ostatecznie, że najbardziej interesujące wyniki daje korelacja średniej wartości liczby Nusselta oraz powierzchniowej strefy stagnacji.

Porównując ze sobą średnie wartości liczb Nusselta wyznaczone metodą elektrochemiczną z udziałem stref stagnacji mierzonych zarówno jako pole powierzchni w badanym obszarze, jak i styk strefy z rurką można zauważyć stosunkowo dobrą korelację.



Rysunek 12-16 Korelacja pomiędzy średnią liczbą Nusselta a udziałem procentowym pola powierzchni strefy stagnacji w badanym obszarze.

Analizując powyższy wykres można stwierdzić bezpośredni wpływ wielkości strefy stagnacji na intensywność wymiany ciepła.

Można zatem potwierdzić postawioną hipotezę wynikającą ze studiów literaturowych, że główną przyczyną zmian wartości liczby Nusselta dla przepływu strugi dwufazowej jest zaburzenie pola przepływu płynu którego miarą jest wielkość formującej się strefy stagnacji.

13. Wnioski.

1. Zastosowana metoda wizualizacji przepływu DPIV może być z powodzeniem stosowana do uzyskania informacji o hydrodynamice przepływu mieszaniny dwufazowej w przestrzeni międzyrurowej w sposób nieinwazyjny.
2. Zastosowana metoda elektrochemiczna pomiaru współczynnika wnikania ciepła na bazie analogii Chiltona-Colburna może być skutecznie stosowana do badań procesów wymiany ciepła przy przepływie dwufazowym w przestrzeni międzyrurowej.
3. Poszukując związku pomiędzy przepływem mieszaniny dwufazowej a wymianą ciepła, potwierdzono korelację pomiędzy wielkością stref stagnacji zależną od strumienia dozowanych faz a intensywnością wymiany ciepła.
4. Metoda VDI obowiązująca dla przepływu jednofazowego wokół pęku rur nie powinna być stosowana do obliczania wymiany ciepła dla przepływu mieszaniny dwufazowej przez pęk rur, przy wykorzystaniu wartości prędkości mieszaniny dwufazowej jako sumy prędkości pozornych. Wykorzystany w metodzie VDI współczynnik stref stagnacji ψ powinien uwzględniać jego zmienność dla przepływu dwufazowego.

14. Bibliografia

- [1] ADRIAN R.J., *Particle Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics*, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 23, p 261-304
- [2] AGOSTINI F.: Boiling on a tube bundle: heat transfer, pressure drop and flow patterns. These nr 4113. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne. Suisse 2008
- [3] ALBRECHT H.E.; *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*, Springer, New York 2003
- [4] ALTERNATIVE FUELS LABORATORY <http://afl.mcgill.ca>
- [5] APRIN, L., MERCIER, P., AND TADRIST, L.: *Experimental analysis of local void fractions measurements for boiling hydrocarbons in complex geometry*. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 33(4) p. 371–393 2007
- [6] BARLETT D.A. *The Fundamentals of heat exchangers. The Industrial Physicist*, American Institute of Physics, 1996
- [7] BENDAT J.S., PIERSOL A.G.: *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*, PWN, Warszawa 1976.
- [8] BIENIASZ B. *Wykorzystanie elektrolizy i analogii wymiany ciepła i masy w projektowaniu wymienników ciepła z konwekcją wymuszoną*, Rozprawa nr 27, Wydawnictwo uczelniane Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 1980
- [9] BIENIASZ B. *Wymiana ciepła i masy*. Laboratorium, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 1997
- [10] BIENIASZ B., KIEDRZYŃSKI K., SMUSZ R., WILK J., *Effect of positioning the axis of a lamellar rotor model of a sucking and forcing regenerative exchanger on the intensity of convective mass/heat transfer*, Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 40, No 14, p. 3275-3282, 1997
- [11] BIENIASZ B., *Konwekcyjna wymiana masy/ciepła w płytkowych wirnikach regeneratora obrotowego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005
- [12] BIENIASZ B., *Short ducts consisting of cylindrical segments and their connective mass/heat transfer, pressure drop and performance analysis.*, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 41, p. 501-511, 1998
- [13] BIENIASZ B., WILK J. *Forced convection mass/heat transfer coefficient at the surface of the rotor of the sucking and forcing regenerative exchanger*, International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 38 No 10, p. 1823–1830, 1995

- [14] BIENIASZ B., *Wykorzystanie elektrolizy do badań współczynnika wymiany ciepła przy konwekcji wymuszonej na podstawie analogii między wymianą masy w procesie elektrodowym a wymianą ciepła*. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Rozprawy nr 5, Rzeszów, 1975
- [15] BIEŃKOWSKI G.: *Zastosowanie cyfrowej anemometrii obrazowej do wyznaczania pól prędkości*, Praca dyplomowa magisterska, Płock 1999.
- [16] BOUHAIRIE S. *Selecting Baffles for Shell-and-Tube Heat Exchangers*, American Institute of Chemical Engineers (AIChE), Heat Transfer Research 2012
- [17] BURNSIDE B.M., MILLER K.M., MCNEIL D.A., BRUCE T., *Flow velocities in an experimental kettle reboiler determined by particle image velocimetry*, International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 48 s. 1000–1016, 2004
- [18] CHEN B., GUO L., *Particle Image Velocimetry Measurement of Flow Across Tube Bundle in Waste Heat Boiler*, J. of Thermal Science Vol. 9, No 3, 2000
- [19] 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, Vol. 49, No (21-22), s. 4220-4230. 2006
- [20] CHILTON T., COLBURN A.: *Mass transfer absorption coefficients. Prediction from data on heat transfer and fluid friction*. Ind. Eng. Chem., Vol. 26, No 11, s. 1183-1187, 1934
- [21] CHO H. H., WON C. H., RYU G. Y., RHEE D. H., *Local heat transfer characteristics in a single rotating disk and co-rotating disks*. Springer-Verlag, Microsystem Technologies Vol. 9, p. 399–408, 2003
- [22] CHO. H.H., LEE S.Y., RHEE D.H., *Effects of cross ribs on heat/mass transfer in a two-pass rotating duct*, Heat and Mass Transfer Vol.40, p. 743–755, 2004
- [23] CHO. H.H., LEE S.Y., RHEE D.H., WON J.H., *Heat/Mass transfer in a two-pass rotating rectangular duct with and without 70 -angled ribs*, Heat and Mass Transfer Vol. 40, p. 467–475, 2004
- [24] CIEŚLIŃSKI J.T., KRASOWSKI K.: *Badania przejmowania ciepła podczas wrzenia na pęku rur ogrzewanych elektrycznie*. Acta Energetica Vol. 3, p. 31-40, 2010
- [25] COMSOL – Cojugate Heat Transfer Blog <http://comsol.com/>
- [26] CORNWELL K., DUFFIN H.W., SCHULLER R.B., *An experimental study of the effects of fluid flow on boiling within a kettle reboiler tube bundle*, ASME Paper No 80-HT-45, 1980
- [27] CYGAŃSKI A.: *Chemiczne metody analizy ilościowej*, WNT, Wrzesień 2005

- [28] DEVANATHAN N., MOSLEMIAN D., DUDUKOVIĆ M.P.; Flow mapping in bubble columns using CARPT. Chem Eng. Sci. No 45, s. 2285-2291. 1991
- [29] DIEHL J.E. Calculate condenser pressure drop, Hydrocarbon Processing, Vol 36, No 10, s. 147-153, 1957
- [30] DIEHL J.E., UNRUCH C.H., *Two phase pressure drop in horizontal crossflow through tube banks*, ASME paper No 58-HT-20, 1958
- [31] DZIUBIŃSKI M.: *Hydrodynamika przepływu mieszanin dwufazowych ciecz-gaz*, Politechnika Łódzka, Monografie, Łódź 2005.
- [32] EDWARDS J.E., *Design and Rating Shell and Tube Heat Exchangers*, P & i Design Ltd, Teesside, United Kingdom, 2008
- [33] ELVIS E. DOMINGUEZ-ONTIVEROS, YASSIN A. HASSAN, *Non-intrusive experimental investigation of flow behavior inside a 5×5 rod bundle with spacer grids using PIV and MIR*, Nuclear Engineering and Design No 239, s. 888–898, 2009
- [34] FALCO R.E., NOCERA D.; *Quantitative multipoint measurements and visualisation of dense liquid-solid flows using laser induced photochemical anemometry (LIPA) in particulate two-phase flow*. Roco M.C. Butterworth-Heinemann, Boston 1992
- [35] GIORGIO A., CAVATORTA O., BOHM U., *Local mass transfer for tube banks in two phase flow*, The Canadian Journal of Chemical Engineering, No 72, 1994
- [36] GIORGIO A., CAVATORTA O., BOHM U., *Mass transfer in tube banks with two - phase flow*, The Canadian Journal of Chemical Engineering, No 71, s. 63-67, 1993
- [37] GNIELINSKI V.: *Equations for calculating heat transfer in single tube rows and banks of tubes in transverse flow*. Int Chem Eng Vol. 19, No 3, p. 380–390, 1979
- [38] GRANT I.D.R. *Two phase flow and pressure drop on the shell side of shell and tube heat exchangers*, *Heat and Fluid Flow in steam and gas turbine plants*, Pub No 3, Inst. Mech. Engr. London, s. 244-251 1973
- [39] GRANT I.D.R., CHISHOLM D.: *Two phase flow in the shell side of a segmentally baffled shell and tube heat exchanger*. Journal of Heat Transfer No. 101, p. 38-42, 1979
- [40] GRANT I.D.R., MURRAY *Pressure drop on the shell-side of a segmentally baffled shell-and-tube with horizontal two phase flow*, NEL report, No 560, 1974
- [41] GRANT I.D.R., MURRAY *Pressure drop on the shell-side of a segmentally baffled shell-and-tube with vertical two phase flow*, NEL report, No 500, 1972

- [42] GRASSMANN P., IBL N., TRÜB J.: *Elektrochemische Messung von Stoffübergangszahlen*, Chemie Ing. Tech, 83, p. 529–533, 1961
- [43] GUZIAŁOWSKA J.: *Badanie przepływu mieszaniny gaz-ciecz w wymienniku z przegrodami*, Praca Doktorska, Politechnika Opolska 2008
- [44] HARA F., IJIMA T: *Vibration of two circular cylinders in tandem subjected to two-phase bubble cross-flows*. Int. Symposium on Flow Induced Vibrations and Noise, Chicago, p. 63-78, 1988
- [45] HARA F.: *a flow visualization study of a single row circular cylinders vibrating in water and two-phase cross flows*. Int. Symposium on Flow Induced Vibrations and Noise, Chicago p. 77-89, 1988
- [46] HARA F.: *Air-bubble effects on vortex-induced vibrations on a circular cylinder*. *Symposium on flow induced vibrations*, ASME Winter Annual Meeting, New Orleans, p. 103-113, 1984
- [47] HARA F.: *Vibration of a single row of circular cylinders subjected to two-phase bubble cross-flow*. Int. Conference on Flow Induced Vibrations, Bowness-on-Widernere, p. 203-208, 1987
- [48] HOBLER T., *Ruch Ciepła i Wymienniki*, Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1959.
- [49] HOPKOWICZ M., PIETRZYK Z.: *Pomiar współczynnika dyfuzji metodą wirującego dysku oraz dynamicznego współczynnika lepkości i gęstości dla układów $K_3Fe(CH)_6$, $K_4Fe(CH)_6$, $NaOH$* , Inżynieria Chemiczna, Nr 4 s. 843-853, 1977
- [50] HUANG, X., WANG, L., AND JIA, F.: *Study of two-phase flow regime identification in horizontal tube bundles under vertical upward cross-flow condition using wavelet transform*. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, Vol. 2, No 3, p. 333–338, 2008
- [51] IWAKI C., CHEONG K. H., MONJI H., MATSUI G., *PIV measurement of the vertical cross-flow structure over tube bundles*, *Experiments in Fluids* No 37, p. 350–363, 2004
- [52] IWAKI C., CHEONG K. H., MONJI H., MATSUI G., *Vertical, bubbly cross-flow characteristics over tube bundles*, *Experiments in fluids* No 39, p. 1024-1039, 2005
- [53] JATZLAU B: *Schwingungsanregungen in zweiphasig durchstroemten, unbeheizten and beheizten rohrbuendeln dissertation*, Technische Universitaet Muenchen, 1990
- [54] JAYO E., NIEVA I., BOHM U. *Variation in the mass transfer through a bank of tubes with a triangular arrangement*, *Latin American J. Heat Mass Transfer*, No 7, p. 253-261, 1985

- [55] JENSEN K. D., *Flow Measurements*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering, Brazil, 2004.
- [56] KALISZ S., PRONOBIS M., *Influence of non-uniform flow distribution on overall heat transfer in convective bundle of circulating fluidized bed boiler*, Heat Mass Transfer No. 41, p. 981–990, 2005
- [57] KARAŚ M., ZAJĄC D., ULBRICH R.: Identyfikacja struktur przy przepływie gaz ciec w wymienniku ciepła o nie-wielkich rozmiarach z wykorzystaniem cyfrowej anemometrii obrazowej DPIV. Inżynieria i Aparatura Chemiczna tom 49(41) nr 6, 2010
- [58] KAROLCZUK A., ROBAK G.: *Strain measurements using image and correlation analysis*, 6th International Conference Mechatronic Systems and Materials, 5 - 8 July, Opole, Politechnika Opolska, ps. 4 (CD), 2010
- [59] KAROLCZUK A., ZAJĄC D.: *Displacement measurements based on the image analysis methods using Matlab*, Transfer of Innovation to the Interdisciplinary Teaching of Mechatronics for the Advanced Technology Needs, Eds. E. Macha and G. Robak, Opole University of Technology, p. 148-167, Opole, 2009
- [60] KAYS W.M., LONDON A.L.: *Compact heat exchangers*, Krieger Publishing Malabar, FL, 1998
- [61] KEIRSBULCK L., LABRAGA L., MAZOUZ A., TOURNIER C.: *Influence of surface roughness on anisotropy in turbulent boundary layer flow*, Experiment in Fluids, Springer–Verlag, 2002
- [62] KHOPKAR A., RAMMOHAN A., RANADE V., DUDKOVIC M.: *Gas–liquid flow generated by a Rushton turbine in stirred vessel: CARPT/CT measurements and CFD simulations*, Chem. Eng. Sci. No 60, 2005.
- [63] KONDO M., NAKAJIMA K.: *Experimental investigation of air – water two phase upflow across horizontal tube bundles*. Bull JSME Vol. 23, No 177, p. 385-393, 1980
- [64] KREITH F., MAGLIK R.M., BOHM M.S., *Principles of heat transfer*, seventh edition, Cengage Learning Inc, 2011
- [65] Kuppan T., *Heat Exchanger Design Handbook*, Marcel Dekker, Inc. New York, 2000
- [66] KUTTANEŁADZE S., MALENKOV I.: *Experimental investigation of the analogy between the process of boiling and bubbling*. J. of applied mechanics and technical physis, Vol. 7, No 2, p. 97-99, 1966
- [67] LABRAGA L., BERKACH T., *Mass transfer from a rotating cylinder with and without cross flow*, Int. J. Heat Mass transfer, No 44, p. 2493-2499, 2004

- [68] LABRAGA L., BOURABA A., BERKAH T.: *Wall shear stress from a rotating cylinder in cross flow using the electrochemical technique*, Experiments in Fluids, Springer–Verlag, 2002
- [69] LEONG L.S., CORNWELL K. *Heat transfer coefficients in a reboiler tube bundle*, The chemical engineer, No 343, p. 219-221, 1979
- [70] LI H. D., KOTTKE V., *Analysis of local shell side heat and mass transfer in the shell-and-tube heat exchanger with disc-and-doughnut baffles*, International Journal of Heat and Mass Transfer No 42, p. 3509-3521, 1999
- [71] LI H. D., KOTTKE V., *Effect of baffle spacing on pressure drop and local heat transfer in shell-and-tube heat exchangers for staggered tube arrangement*, Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 41, No 10, p. 1303- 1311, 1998
- [72] LI H. D., KOTTKE V., *Local heat transfer in the first bank compartment of the shell-and tube heat exchangers for staggered tube arrangement*, Experimental Thermal and Fluid Science No 16, p. 342-348, 1998
- [73] LI H. D., KOTTKE V., *Visualization and determination of local heat transfer coefficients in shell-and-tube heat exchangers for in-line tube arrangement by mass transfer measurements*, Heat And Mass Transfer No 33, p. 371-376, Springer Verlag, 1998
- [74] LI H. D., KOTTKE V., *Visualization and determination of local heat transfer coefficients in shell-and-tube heat exchangers for staggered tube arrangement by mass transfer measurements.*, Experimental Thermal and Fluid Science, No 17, p. 210-216, 1998
- [75] LIAN, H.Y., CHAN, A.M.C., KAWAJI, M.: *Effects of void fraction on vibration of tubes in tube bundles under two-phase cross flow*, HTD-Vol. 230/NE-Vol. 9, Symposium on Flow-Induced Vibration and Noise - Volume 1, ASME, 1992,
- [76] LIENHARD J. H.: *Synopsis of lift, drag, and vortex frequency data for rigid circular cylinders*, Bulletin 300, Washington State University, 1966
- [77] LIN C. S., MOULTON R. W., PUTNAM G. L. *Mass transfer between solid wall and fluid stream*. Ind. Eng. Chem. No 45, p. 636, 1953
- [78] LIN, C., CHIU, P.H., SHIEH, S.J., *Characteristics of horseshoe vortex system near a vertical plate-base plate juncture*. Experimental Thermal and Fluid Science No 27, p. 25–46, 2002
- [79] LYTRON – *Total Thermal Solutions* <http://www.lytron.com/>

- [80] MASIUKIEWICZ M., ZAJĄC D., ULBRICH R.: *Application of stereology for assessment of two-phase structures*, Trans. of the Institute of Fluid Flow Machinery, , No 125, p. 39-54, 2013
- [81] MACBETH R., *Application of the diffusion controlled electrochemical mass transfer modeling technique to the systematic acquisition of heat exchanger design data*, Atomic Energy Establishment, Winfrith, 1972
- [82] MICKLEY N. *Local Shell-side coefficients in shell and tube heat exchangers - the use of mass transfer technique*, submitted for the degree of Doctor of Philosophy, University of Aston, Birmingham, 1973
- [83] MIZUSHIMA T.: *The electrochemical method in transport phenomena*, Advances in heat transfer No 7, p. 87-161, 1970
- [84] MUKHERJEE R., *Effectively design shell-and-tube heat exchangers*, Chemical Engineering Progress, India 1998.
- [85] NAKAJIMA K. *Boiling heat transfer outside horizontal multitube bundles*, Heat Transfer-Jap. Res., Vol. 7, No 1, p. 1-24, 1978
- [86] NIEVA I., BOHM U., *Local mass transfer for cross flow through tube banks: Equilateral, triangular layout at intermediate Reynolds numbers*, Int. Comm. Heat Mass Transfer, No 12, p. 277-285, 1985
- [87] NIEVA I., BOHM U., *Mass transfer at single cylinders and at tandem arrangements of two cylinders normal to the flow*, Latin American J. Heat Mass Transfer, No 3 p. 39-48, 1979
- [88] NIEVA I., BOHM U., *Mass transfer at vertical and horizontal arrangements of cylinders normal to the flow.*, Latin American Journal, Heat Mass Transfer, No 4, p. 109-119, 1980
- [89] NOGHREHKAR, G.R., KAWAJI, M., CHAN, A.M.C.: *Investigation of two-phase flow regimes in tube bundles under cross-flow conditions*, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 25 No 5, p. 854-874, 1999
- [90] NOGUEIRA J., LECUONA A., RODRIGUEZ P. A., *Local field correction PIV: on the increase of accuracy of digital PIV systems*, Experiments in Fluids No 27 p. 107-116, 1999
- [91] OLINTO C.R., INDRUSIAK M.L.S., ENDRES L.A.M., MOLLER S.V.: *Experimental study of the characteristics of the flow in the first rows of tube banks*. Nuclear engineering and design No 239, p. 2022-2034, 2009
- [92] ORZECZOWSKI Z.: *Przepływy dwufazowe jednowymiarowe ustalone adiabaticzne*, PWN, Warszawa 1990.

- [93] PATIL V. K., SHARMA M.M.: *Solid-liquid mass transfer coefficient in bubble columns up to one meter diameter*, Chem. Eng. Des., No 61, p. 21, 1983
- [94] PAUL S.S., TACHIE M.F., ORMISTON S.J., *Experimental study of turbulent cross-flow in a staggered tube bundle using particle image velocimetry*, Int. J. Heat Fluid Flow No 28, p. 441-453, 2007
- [95] PETTIGREW M.J., TAYLOR C.E., KIM B.S.: *Vibrations of tube bundles in two-phase cross flow: part 1 – hydrodynamic, mass and damping*. Int. Symposium on Flow Induced Vibrations and Noise, Chicago, No 2, p. 79-103, 1988
- [96] PIEROTTI G., BUSSY B.: *Experimental studies of two-phase flow across tube banks*, European Two phase flow Group Meeting, Trondheim, Paper H2, 1988
- [97] PUHARIC M., RISTIC S., KUTIN M., ADAMOVIC Z.: *Laser Doppler Anemometry in hydrodynamic testing*. Journal of Russian Laser Research, Vol. 28, No 6, 2007
- [98] RAFFEL M., WILLERT CH. E., KOMPENHANS J.: *Particle Image Velocimetry: a practice guide*, Springer, Berlin 1998
- [99] ROONEY D.H.: *Heat transfer and fluid flow digest* Vol. 15, No 1, 1982
- [100] SAHIN B., AKKOCA A., OZTURK N.A., AKILLI H., *Investigations of flow characteristics in a plate fin and composed of single cylinder.*, Int J Heat Fluid Flow No 27, p. 522-530, 2008
- [101] SAUNDERS E.A.D., *Features relating to thermal design in Heat Exchanger Design Handbook*, (E.U. Schulder, editor-in-chief), Vol4, Hemisphere, Section 4.2.5, Washington, USA, 1983.
- [102] SCHRAGE D.S., HSU J.T., JENSEN M.K: *Two-phase pressure drop in a vertical cross flow across a horizontal tube bundle*. AIChE J., , Vol. 34, p. 107-115, 1988
- [103] SHAH, R.K., *Classification of Heat Exchangers*, Lecture Notes, December, p. 1-68. 1990
- [104] SHAH, R.K., *Compact heat exchanger design procedures, in Heat Exchangers: Thermal-Hydraulic Fundamentals and Design*, eds., Hemisphere, 1981
- [105] SHAH, R.K., SEKULIC D.P.: *Fundamentals of Heat Exchanger Design*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003
- [106] SHUTZ G.: *Natural convection mass transfer measurements by the limiting current technique*, Adv. Chem. Eng, 10, s. 211-324, 1978
- [107] SIEJKA K.: *Nierównomierność wymiany ciepła w pęku rur przy przepływie dwufazowym*. Rozprawa Doktorska, Politechnika Opolska, Opole 2006

- [108] SKOCZYLAŚ D.: *Wpływ parametrów geometrycznych na opory przepływu w przestrzeni międzyrurowej wymiennika ciepła*, praca doktorska, Politechnika Opolska, Opole, 2004.
- [109] ŚLEZIAK M.: *Przepływ dwufazowy w przestrzeni międzyrurowej*. praca doktorska, Politechnika Opolska, Opole, 2005
- [110] STREK F., KARCIŃSKI J.: *Zastosowanie metody elektrochemicznej do badania transportu masy w obszarze przyściennym mieszalnika cieczy*, Inżynieria Chemiczna i Procesowa, No 20, p. 3–22, 1999
- [111] SUTHERLAND L.A., MURRAY I.: *Pressure drop and heat transfer on the shell side of a model heat exchanger with two phase flow*. National Engineering Laboratory, Report NEL-395, 1969
- [112] SZANTO D.A., CLEGHORN S., PONCE-DE-LEON C., WALSH F.C.: *The limiting current for reduction of ferricyanide ion at nickel: The importance of experimental conditions*. AIChE Journal, No 54, p. 802-810, 2008
- [113] TABOREK J., *Evolution of heat exchanger design techniques*. Heat Transfer Engineering, No 1, s. 15-29, 1979
- [114] TEMA *Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association*, 6th edn., New York 1978
- [115] THAN S.T.M., LIN K.A., MON M.S. Heat Exchanger Design, World Academy of Science, Engineering and Technology. No 46, 2008
- [116] ULBRICH R., MEWES D.: *Relation between gas void fraction in upward and downward flow*. Multiphase Transport Particular Phenomenon p. 279-294, 1994
- [117] ULBRICH R., MEWES D.: *Vertical upward gas-liquid two-phase flow across a tube bundle*. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 20 No. 2, p. 249-272 1994
- [118] ULBRICH R.: *Struktury przepływu mieszaniny gaz-ciecz w przestrzeni międzyrurowej*. Studia i Monografie, Z. 74, Opole 1994
- [119] ULBRICH R.: *Problemy drgań pęku rur indukowanych przepływem mieszaniny dwufazowej*, Politechnika Opolska, Studia i Monografie, z. 119, Opole 2000
- [120] VAN ROOYEN E.: *Boiling on a tube bundle: heat transfer, pressure drop and flow patterns*. These No 5226, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Suisse 2011
- [121] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC): *VDI Heat atlas second edition*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2010

- [122] VELASCO F.J.S., LOPEZ C.P., HERRANZ L.E.: *Expansion of a radial jet from a guillotine tube breach in a shell and tube heat exchanger*. Experimental Thermal and Fluid Science No 32, p. 947-961, 2007
- [123] WESTERWEEL J., *Digital particle image velocimetry Theory and Application.*, Delft University Press, 1993
- [124] WILK J., *Błąd analogii w badaniach konwekcyjnych wymiany masy/ciepła techniką elektrolityczną.*, XI Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy, Gliwice 2001
- [125] WILK J., *Experimental investigation of convective mass/heat transfer in short mini channel at low Reynolds numbers.*, Experimental Thermal and Fluid Science, No 33, p. 267-272, 2009
- [126] WILK J., *Investigation of heat transfer In short minichannels*, Monografia, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2013
- [127] WILK J., *Mass/heat transfer coefficient in the radially rotating circular channels of the rotor of the high speed heat regenerator*. International Journal of Heat and Mass Transfer No 47, p. 1979-1988, 2004
- [128] WILKE C.R., EISENBERG M., TOBIAS C.W., *Correlation of limiting current under free convection conditions*, J. Electrochem. Soc., No 100, p. 513. 1953
- [129] WOLVERINE TUBE INC. RESEARCH AND DEVELOPMENT TEAM, *Wolverine Engineering Data Book II*, Electronic distribution, 2001
- [130] XU, G.P., TSO, C.P., TOU, K.W.: *Hydrodynamics of two-phase flow across a horizontal tube bundle*, Int. J. of Multiphase Flow, Vol. 24, No 8, , 1998
- [131] XU, G.P., TOU, K.W., TSO, C.P.: *Two-phase void fraction and pressure drop in horizontal crossflow across a tube bundle*, J. of Fluids Eng. No 120, p. 140-145, 1998
- [132] YOKEL S., *Double tube sheet heat exchanger design stops shell-tube leakage*, Chem Eng, May, p. 133-136, 1973
- [133] ZAJĄC D., ULBRICH R., *Nieinwazyjne metody badań przepływów dwufazowych gaz-ciecz*. Studia i Monografie, Nr 174, Politechnika Opolska 2005.
- [134] ZAJĄC D.: *Zastosowanie metody DPIV dla przepływu w przestrzeni międzyrurowej wymiennika ciepła, wykorzystanie metod analizy obrazu do oceny nierównomierności przepływu gaz-ciecz w elementach płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła*. Praca zbiorowa pod redakcją R. Ulbricha, Politechnika Opolska, Opole 2006.
- [135] ZHANG Q., Tobias G., LIU Y.: *PIV measurement of fluid flow through staggered tube array*. Proceedings of 13th Asian Congress of Fluid Mechanics, Dhaka, Bangladesh 17-21 December 2010