

# Struktury oraz mapy przepływu R1233zd w okrągłym minikanale przy średnich i wysokich wartościach ciśnienia zredukowanego

Stanisław Głuch <sup>(a)</sup>, Michał Pysz <sup>(a)</sup>, Dariusz Mikielwicz <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Politechnika Gdańska, ul. Gabriela Narutowicza 11/12 80-233, 15-351 Gdańsk, Poland  
[stanislaw.gluch@pg.edu.pl](mailto:stanislaw.gluch@pg.edu.pl)

## STRESZCZENIE

W wiedzy dotyczącej struktur przepływu niskowrzących czynników roboczych w zakresie wysokich temperatur nasycenia (powyżej 120°C) oraz średnich i wysokich wartościach ciśnienia zredukowanego (0.5-0.9) występuje luka. W literaturze obecne są dane dotyczące podobnych wartości ciśnień zredukowanych, ale dla niższych wartości temperatury nasycenia (głównie z zakresu -20°C do 40°C). Wynika to z dotychczasowych zastosowań chłodniczych tych czynników. Stosuje się je oprócz chłodnictwa w energetyce. Przy wysokich wartościach ciśnienia zredukowanego gęstość fazy gazowej jest stosunkowo wysoka, a gęstość fazy ciekłej niska. Pomiędzy fazą ciekłą i gazową występuje niska różnica objętości właściwej. Faza ciekła ma niską wartość napięcia powierzchniowego. Faza gazowa charakteryzuje się stosunkowo wysoką lepkością, a faza ciekła ma obniżoną lepkość. Te zmiany parametrów czynników chłodniczych powoduje znaczne różnice w strukturach przepływu. Przy niskiej wartości ciśnienia zredukowanego, 0,2, zaobserwowano wystąpienie przepływu pierścieniowego już przy stopniu suchości 0,07 dla prędkości masowej  $G=355$  [kg/(m<sup>2</sup>\*s)], natomiast dla ciśnienia zredukowanego o wartości 0,6 przepływ pierścieniowy występuje dużo później, przy stopniu suchości 0,4 dla tej samej prędkości masowej. Zaprezentowano mapy przepływu prędkości masowej w funkcji stopnia suchości dla stałych wartości ciśnienia zredukowanego oraz mapy przepływu dla ciśnienia zredukowanego w funkcji stopnia suchości przy stałej prędkości masowej.

Słowa kluczowe: przepływ dwufazowy, struktury przepływu, mapy przepływu, R1233zd(E), wysoka wartość ciśnienia zredukowanego

## 1. WSTĘP

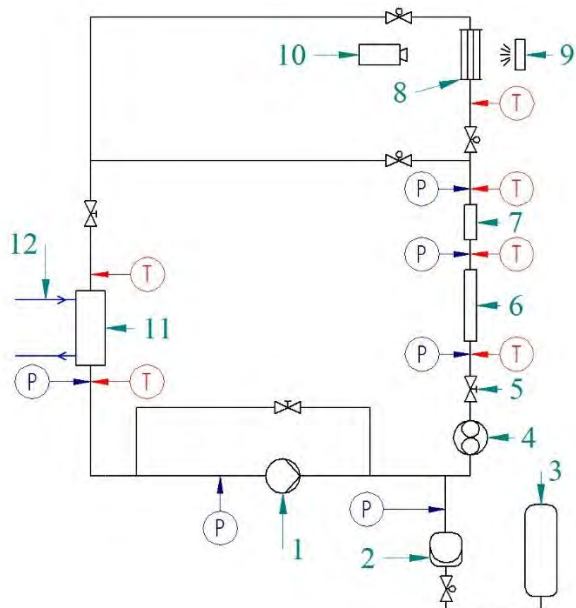
Ważnym trendem w rozwoju nowych technologii jest miniaturyzacja obiektów technicznych. Wysiłek ten wymaga szerokiej wiedzy podstawowej z zakresu mechaniki płynów i wymiany ciepła w konwekcji jednofazowej oraz wrzenia i kondensacji w przepływie. Umiejętność dokładnego przewidywania spadków ciśnienia i wymiany ciepła oraz dobór geometrii i warunków pracy są ważnymi czynnikami przy projektowaniu i wyborze optymalnych ustawień wymienników ciepła. Obecnie wzrasta zainteresowanie czynnikami chłodniczymi o niskim współczynniku globalnego ocieplenia (GWP). Nowe przepisy wymagają, aby aplikacje klimatyzacyjne i chłodnicze nie mogły być produkowane z użyciem fluorowanych gazów cieplarnianych o GWP większym niż 150 (Ust. z d 15.05.2015 r). Prowadzi to do stosowania nowych, ekologicznych czynników takich jak CO<sub>2</sub>, który działa w obszarze bliskim krytycznemu i nadkrytycznemu. Inne zastosowania, takie jak wysokotemperaturowe pompy ciepła czy cykle ORC, pracują przy znacznie wyższych parametrach niż układy chłodnicze. Dane dostępne w literaturze dotyczące wymiany ciepła przez czynniki chłodnicze przy wysokich wartościach temperatury nasycenia są nieliczne. Badania struktur oraz map przepływu są równie znikome.

Cheng i in.(2006) przeprowadzili badania współczynników przejmowania ciepła oraz map przepływu CO<sub>2</sub> podczas wrzenia. Czynnik przebadano dla ciśnienia zredukowanego  $P_{zr}$  od 0,21 do 0,87, prędkości masowej  $G$  od 170 kg/(m<sup>2</sup>\*s) do 570 kg/(m<sup>2</sup>\*s), temperatury od -28°C do 25°C. Nema i in. (2013) przebadali struktury przepływu R134a podczas kondensacji i zaproponowali nowe kryterium tranzycji struktur przepływu. Charnay i in. (2013) przeprowadzili badania struktur przepływu R245fa podczas wrzenia przy 60°C, co odpowiada ciśnieniu 4,6 bar dla prędkości

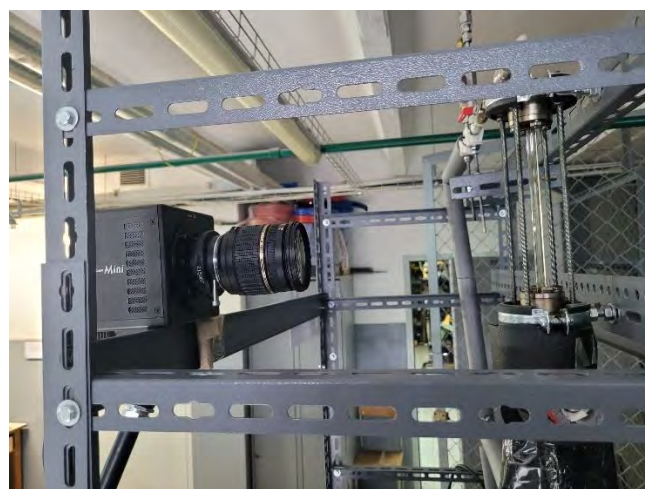
masowej od 100 do 1500  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  przy średnicy wewnętrznej okrągłej rurki 3mm. Charnay i in. (2014) przeprowadzili dodatkowe badania dla temperatury nasycenia  $120^\circ\text{C}$ . Porównali otrzymane wyniki z liniami tranzycji dostępnymi w literaturze. Mino, że struktury przepływu bardziej przypominały te obserwowane w makroskali linia tranzycji była zbliżona do tej obserwowanej w minikanalach.

## 2. BADANIA STRUKTUR ORAZ MAP PRZEPŁYWU

Przeprowadzono badania wizualizacji przepływu dwufazowego nowoczesnego czynnika chłodniczego R1233zd dla wartości ciśnienia zredukowanego od 0,2 do 0,6. oraz dla prędkości masowej  $G$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] od 180 do 445. Temperatura krytyczna badanego czynnika wynosi  $156,6^\circ\text{C}$ , a ciśnienie krytyczne 21,4 bar. Jego wskaźnik GWP (Global Warming Potential) wynosi 1, a jego wskaźnik ODP (Ozone Depleting Potential) wynosi 0 według bazy NIST Acree i in. (2022). Schemat stanowiska badawczego jest przedstawiony na Rys. 1. Ciśnienie panujące w układzie jest ustalone poprzez ciśnieniowy zbiornik z azotem połączony z hydroakumulatorem membranowym. Pompa główna zapewnia przepompowuje czynnik przez układ i pokonuje opory przepływu. Za pompą znajduje się przepływomierz masowy Coriolisa. Dalej jest umieszczony podgrzewacz wstępny, a za nim sekcja pomiarowa współczynników przejmowania ciepła podczas wrzenia. Za sekcją pomiarową znajduje się sekcja wizualizacji, która została przedstawiona na Rys. 2. Składa się ona z rurki borokrzemowej o średnicy wewnętrznej 3mm, grubości ścianki 3 mm oraz długości 200 mm. Za sekcją wizualizacji znajduje się sekcja kondensacji z pośredniczącym układem olejowym, który zapewnia stałe warunki kondensacji. Zdjęcia wykonywano za pomocą szybkiej kamery Photron Fastcam Mini UX100.



**Rysunek 1: Stanowisko badawcze:** 1 - pompa tłokowo membranowa, 2 - hydroakumulator membranowy, 3 - zbiornik azotu pod ciśnieniem, 4 - przepływomierz Coriolisa, 5 - zawór regulacyjny, 6 - podgrzewacz, 7 - sekcja pomiarowa wymiany ciepła, 8 - sekcja wizualizacji, 9 - źródło światła led, 10 - szybka kamera, 11 - skraplacz, 12 - pętla olejowa



**Rysunek 2: Sekcja wizualizacji wraz z szybką kamerą Photron Fastcam Mini UX100. Za sekcją wizualizacji znajduje się źródło światła LED**

## 2.1. Struktury przepływu

Przeprowadzono badania dla ciśnień zredukowanych  $P_{zr}$  od 0,2 do 0,6 wartości ciśnienia krytycznego. Przebadane prędkości masowe to 180, 265, 355 oraz 445  $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ . Rys. 3 przedstawia struktury przepływu dla  $P_{zr}=0,2$ , a Rys. 4 przedstawia struktury przepływu dla  $P_{zr}=0,4$ , a Rys. 5 przedstawia struktury dla  $P_{zr}=0,6$ . Wszystkie rysunki przedstawiają tę samą prędkość masową  $G=355 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , co pozwala porównać różnice w strukturach przepływu. Z powodu dużej różnicy w stosunku objętości właściwej fazy ciekłej i gazowej przy ciśnieniu zredukowanym 0,2 przepływ pierścieniowy występuje już przy stopniu suchości  $x=7\%$ , natomiast dla stopnia suchości 0,6 przepływ pierścieniowy występuje przy  $x=40\%$ . Przepływ pęcherzykowy określono jako ten gdy występują same pęcherzyki. Przepływ korkowy określono występując pojedyncze korki. W sytuacji, gdy w przepływie dominują liczne korki, które są bliskie połączenia w pierścień, lub gdy pierścień nie był ciągły przepływ został określony jako przejściowy. Na Rys. 3 można zaobserwować przepływ korkowy oraz pierścieniowy. Na Rys. 4 oraz Rys. 5 można zaobserwować przepływy pęcherzykowe, korkowe, przejściowe oraz pierścieniowe. Na Rys. 5, Rys. 6, Rys. 7, Rys. 8 Przedstawiono struktury przepływu dla  $P_{zr}=0,6$  oraz dla prędkości masowych kolejno  $G=355 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,  $G=180 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,  $G=265 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  oraz  $G=445 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ . Można zaobserwować przede wszystkim późniejsze pojawienie się struktury pierścieniowej dla niższych prędkości masowych. Ten trend przedstawiono na mapach przepływu w następnym podrozdziale.



**Rysunek 3: Struktury przepływu  $P_{zr}=0,2$   
 $G=355 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  stopnie suchości kolejno: 2%,  
7%, 5,03%**



**Rysunek 4: Struktury przepływu  $P_{zr}=0,4$   
 $G=355 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  stopnie suchości kolejno:  
3,1%, 4,2%, 10%, 23,1%, 80,5%**





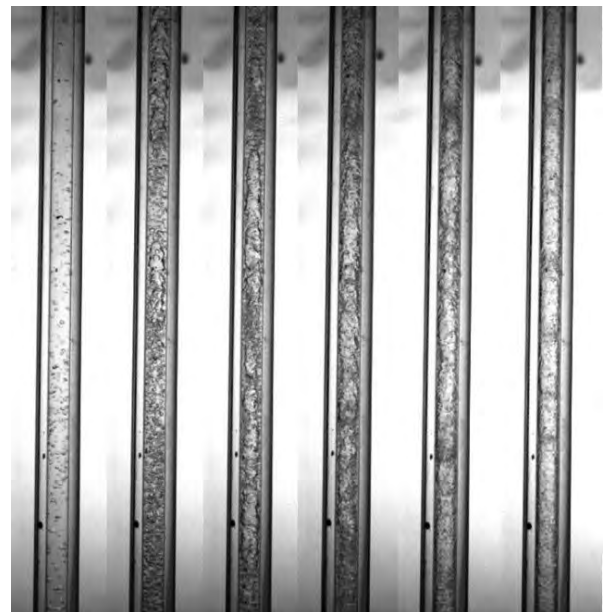
**Rysunek 5: Struktury przepływu  $Pzr=0,6$   
 $G=355 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  stopnie suchości kolejno:  
12%, 15,6%, 19,6%, 23,9%, 36,2%, 60,7%**



**Rysunek 7: Struktury przepływu  $Pzr=0,6$   
 $G=265 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  stopnie suchości kolejno:  
19,6%, 27%, 35,2%, 55,6%**



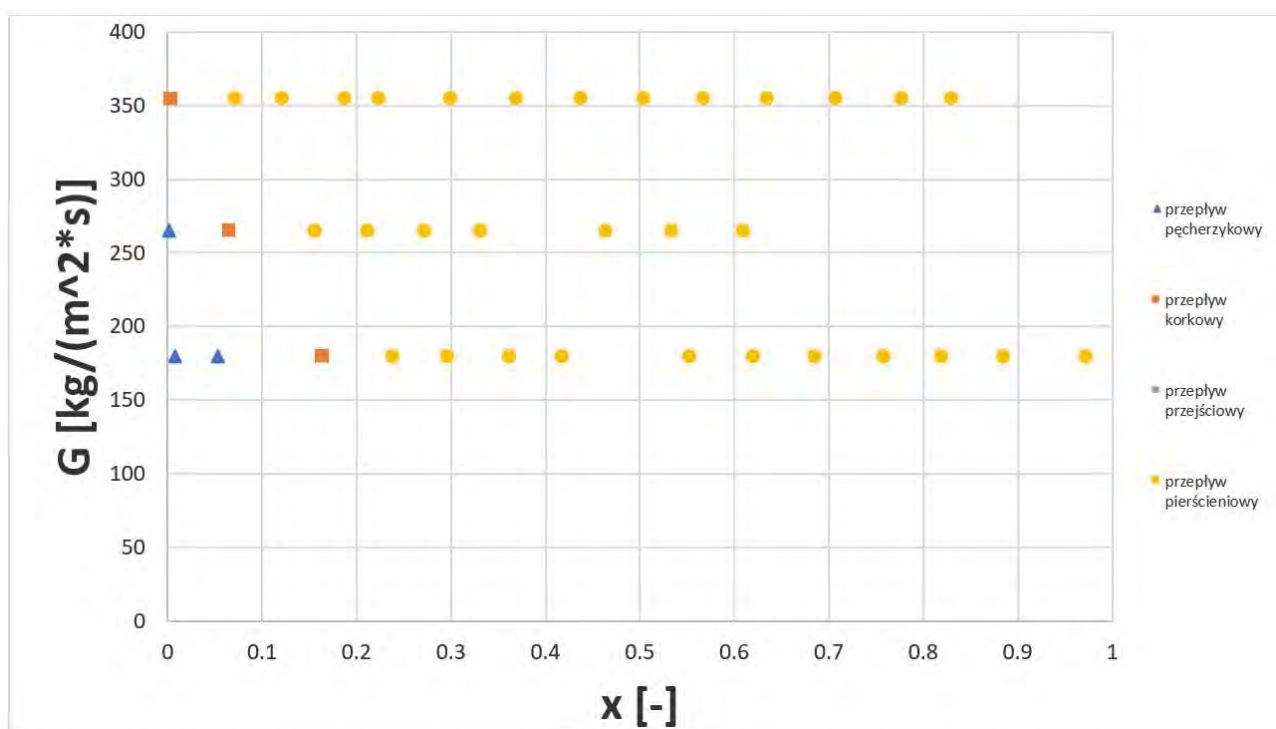
**Rysunek 6: Struktury przepływu  $Pzr=0,6$   
 $G=180 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  stopnie suchości kolejno:  
37,2%, 48,6%, 64,6%, 72,8%, 93%**



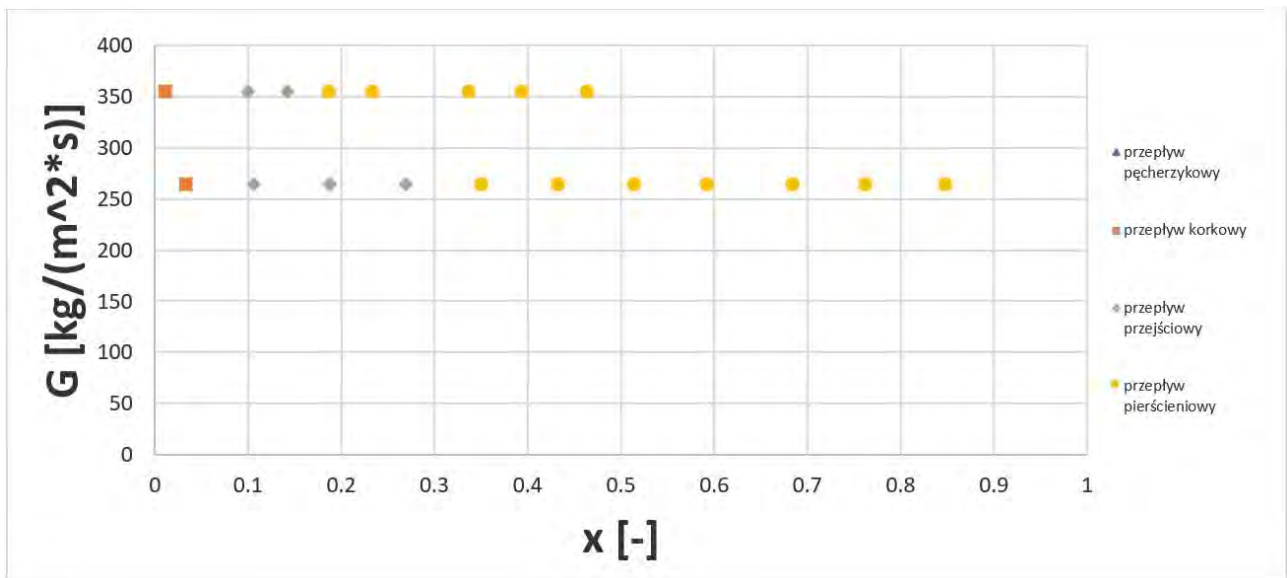
**Rysunek 8: Struktury przepływu  $Pzr=0,6$   
 $G=445 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  stopnie suchości kolejno:  
8,5%, 15,9%, 23,7%, 36,5%, 52,4%, 67,6%**

## 2.2. Mapy przepływu

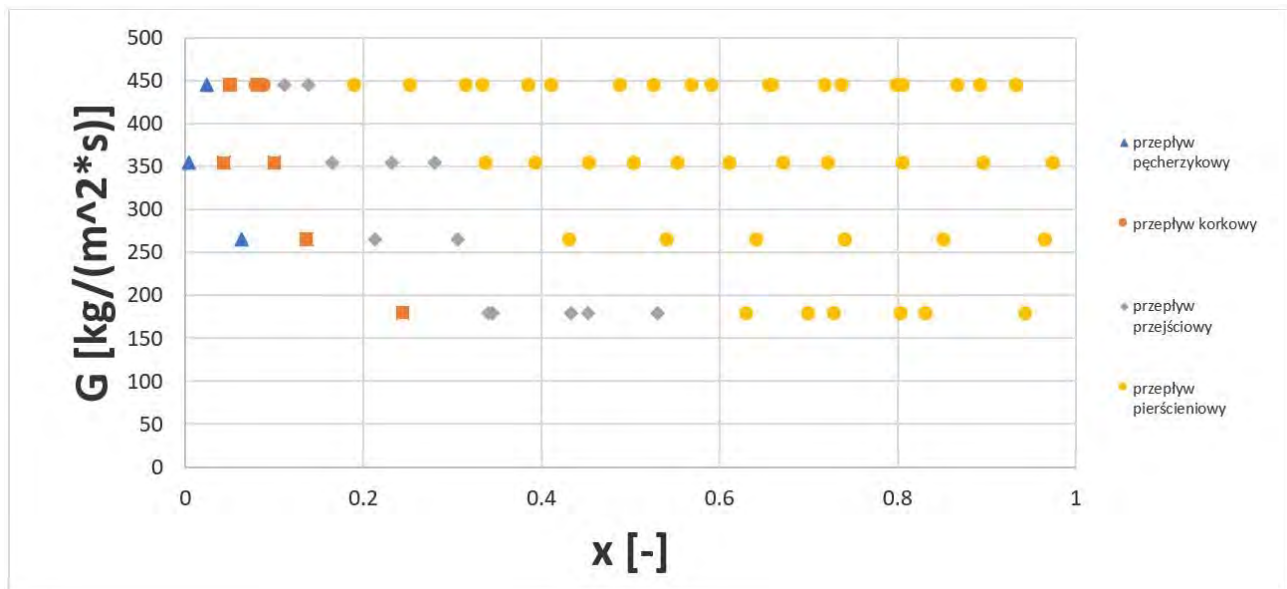
Mapy zostały przedstawione w formie zależności prędkości masowej od stopnia suchości ponieważ takie przedstawienie struktur przepływu pozwala na najlepsze porównanie struktury ze współczynnikami wymiany ciepła. Takie przedstawienie stosują również autorzy wszystkich zacytowanych publikacji. Na Rys. 9 przedstawiono mapę przepływu dla ciśnienia zredukowanego 0,2, na Rys. 10 przedstawiono mapę przepływu dla  $P_{zr}=0,3$ , na Rys. 11 mapę przepływu dla  $P_{zr}=0,4$ , na Rys. 12 przedstawiono mapę przepływu dla  $P_{zr}=0,5$ , a na Rys. 13 przedstawiono mapę przepływu dla  $P_{zr}=0,6$ . Na Rys. 14 przedstawiono mapę przepływu dla prędkości masowej  $G=355 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  w funkcji ciśnienia zredukowanego od stopnia suchości. Na Rys. od 9 do 13 można zaobserwować odwrotną korelację pomiędzy prędkością masową oraz występowaniem przepływu pierścieniowego. Przepływ pierścieniowy występuje najszybciej dla ciśnienia zredukowanego 0,2, a najpóźniej dla  $P_{zr}=0,6$ . Jest to efektem mniejszej różnicy pomiędzy jednostkową objętością właściwą fazy gazowej oraz fazy ciekłej oraz mniejszym napięciem powierzchniowym fazy ciekłej. Opóźnienie występowania przepływu pierścieniowego występuje również dla niższych wartości prędkości masowej.



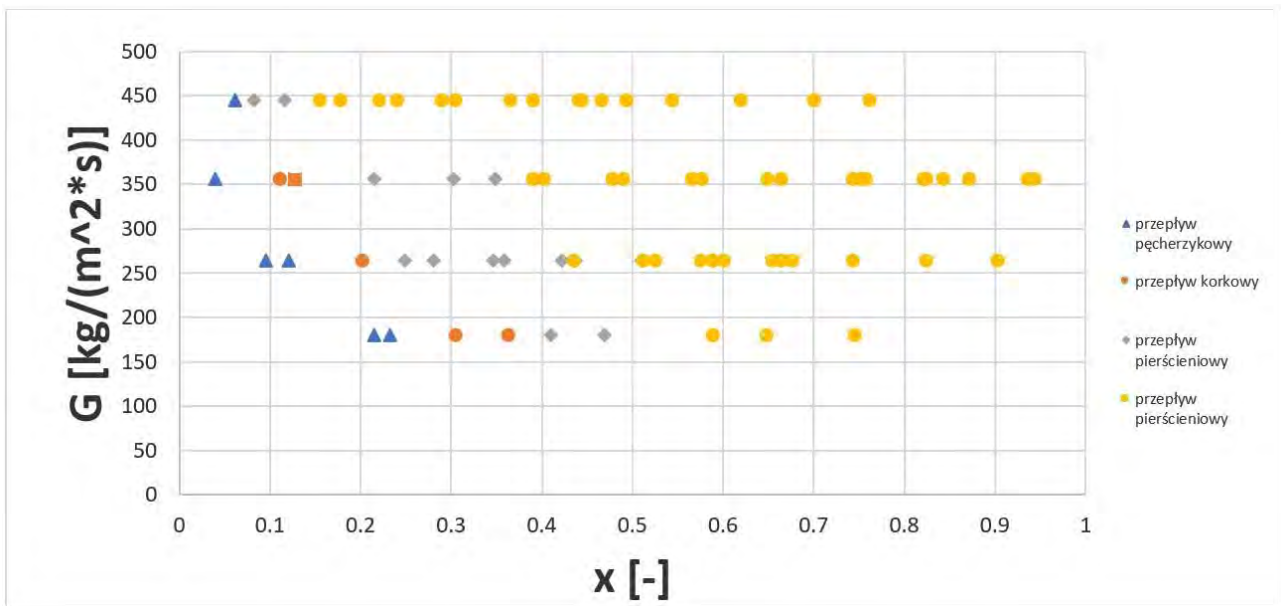
Rysunek 9: Mapa przepływu dla ciśnienia zredukowanego 0,2



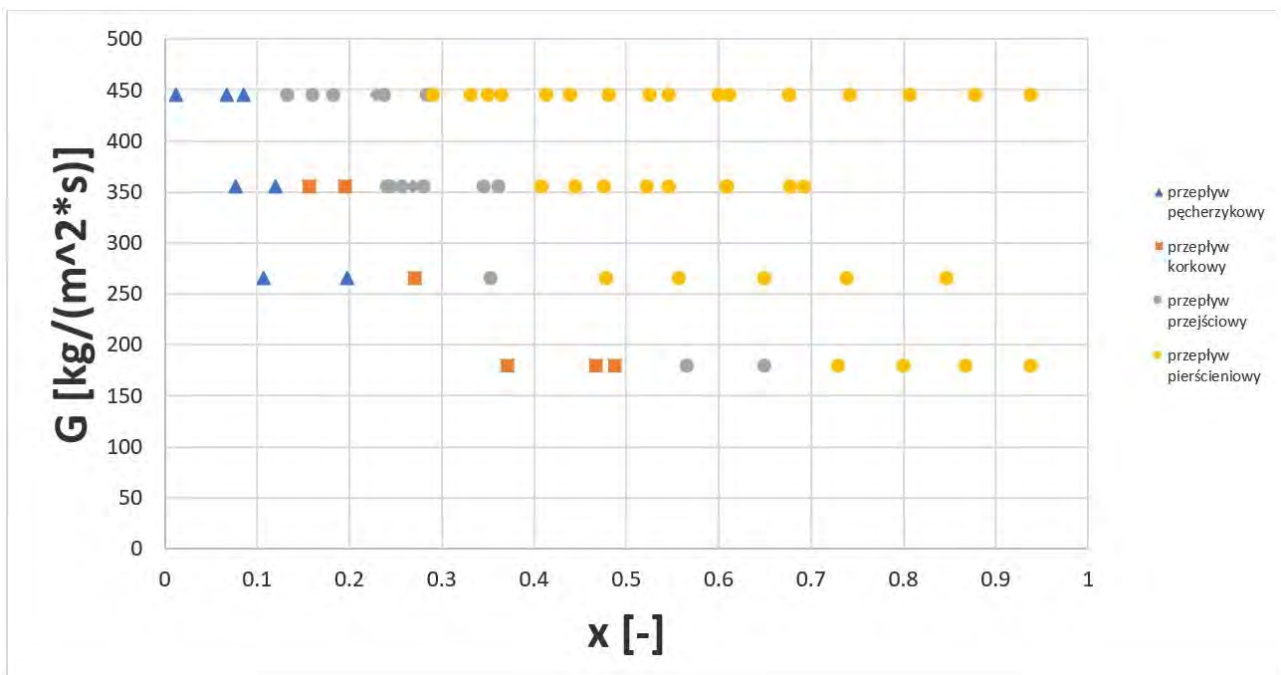
Rysunek 10: Mapa przepływu dla ciśnienia zredukowanego 0,3



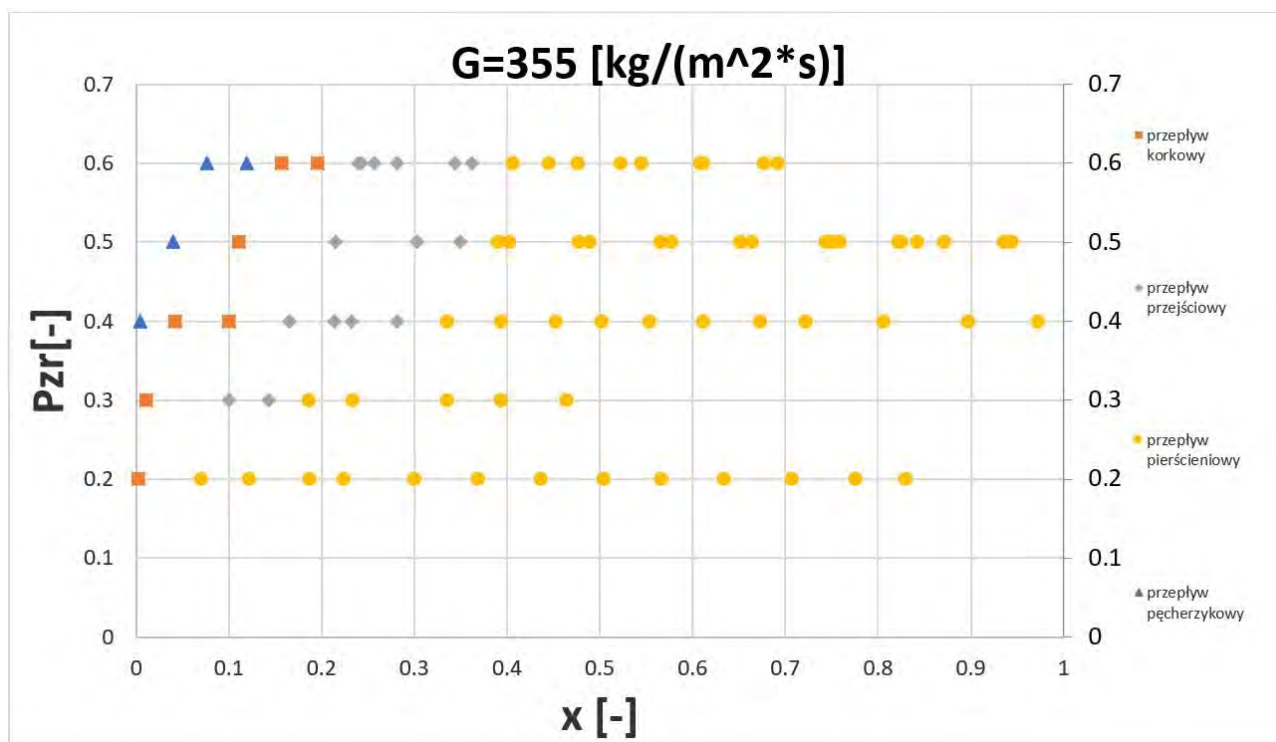
Rysunek 11: Mapa przepływu dla ciśnienia zredukowanego 0,4



Rysunek 12: Mapa przepływu dla ciśnienia zredukowanego 0,5



Rysunek 13: Mapa przepływu dla ciśnienia zredukowanego 0,6



Rysunek 14: Mapa przepływu dla prędkości masowej  $G=355$  [kg/(m<sup>2</sup>\*s)]

### 3. WNIOSKI

Zmiana właściwości fizycznych czynników chłodniczych wraz ze wzrostem temperatury nasycenia ma duży wpływ na struktury oraz mapy przepływu. Przy wysokich wartościach ciśnienia zredukowanego gęstość fazy gazowej jest stosunkowo wysoka, a gęstość fazy ciekłej niska. Pomiędzy fazą ciekłą i gazową występuje niska różnica objętości właściwej. Te właściwości powodują opóźnienie występowania przepływu pierścieniowego. Ponieważ obecność pęcherzyków w przepływie występuje dla dużo wyższych wartości stopnia suchości przy wyższych ciśnieniach zredukowanych nukleacja jako mechanizm wymiany ciepła ma większe znaczenie dla wrzenia przy wysokich temperaturach nasycenia. Warto również zwrócić uwagę na opóźnienie występowania przepływu pierścieniowego dla niższych wartości prędkości masowej. Dalsze prace powinny skupić się na poszerzeniu bazy danych eksperymentalnych oraz na opracowaniu korelacji tranzycji do przepływu pierścieniowego.

### PODZIĘKOWANIA

Badania zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum nauki [numer umowy 2017/25/B/ST8/00755].

### SPIS OZNACZEŃ

$P$	ciśnienie (Bar)	$G$	Prędkość masowa (kg/(m <sup>2</sup> *s))
$T$	temperatura (°C)	$x$	stopień suchości (-)
$Pzr$	ciśnienie zredukowane względem ciśnienia krytycznego (-)		

### BIBLIOGRAFIA

Acree, W., James, J., Chickos, S., 2022. Phase Transition Enthalpy Measurements of Organic and Organometallic Compounds in NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database



Number 69, Eds. P.J. Linstrom and W.G. Mallard, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD.

Charnay, R., Revellin, R., Bonjour J., 2013. Flow pattern characterization for R-245fa in minichannels: Optical measurement technique and experimental results. *Int. J. of Multiphase Flow* 57,169-181.

Charnay, R., Revellin, R., Bonjour J., 2014. Experimental investigation of R-245fa flow boiling in minichannels at high saturation temperatures: Flow patterns and flow pattern maps, *Int. J. of Multiphase Flow* 46,1-16.

Cheng, L., Ribatski, G., Wojtan, L., Thome, J., 2006. New flow boiling heat transfer model and flow pattern map for carbon dioxide evaporating inside horizontal tubes. *Int. J. Heat Mass Transfer* 49,4082–4094.

Nema, G., Garimella, S., Fronk, B., 2014. Flow regime transitions during condensation in microchannels. *Int. J. of Refrigeration* 40,227-240.

Ustawa z dnia 15 maja 2015 r. o substancjach zubożających warstwę ozonową oraz o niektórych fluorowanych gazach cieplarnianych