

Polska Akademia Nauk
Instytut Podstawowych Problemów Techniki



Turbulencja w mikrokanale?

Sławomir Błoński

Motywacja

Turbulencja w układzie mikroprzepływowym?

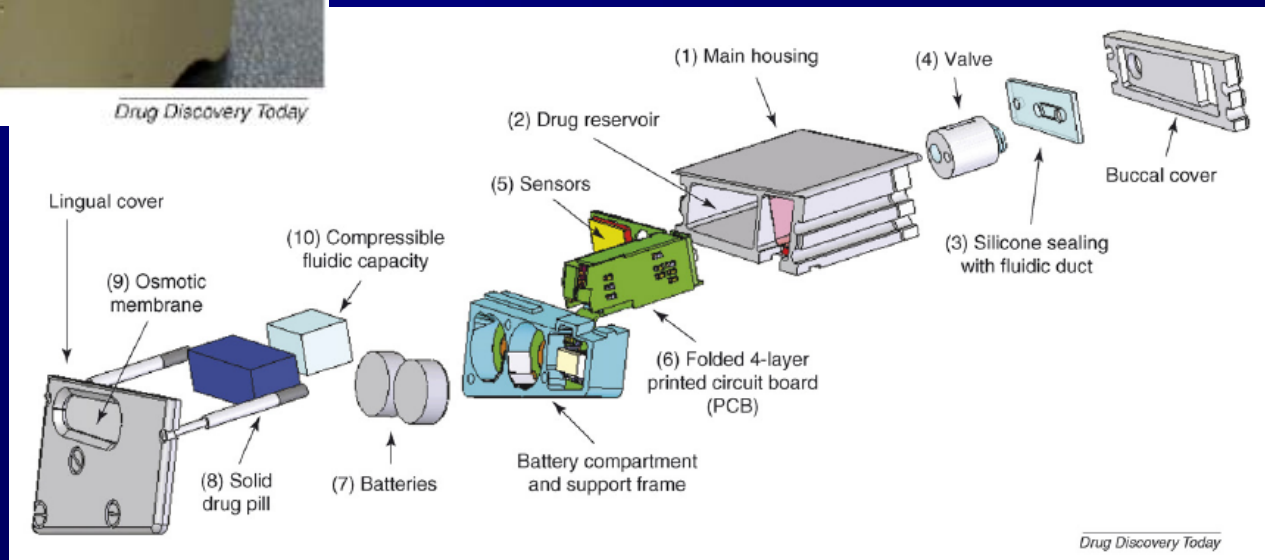
- czy możliwa do zaistnienia?
- czy spotykana w zastosowaniach praktycznych?
 - mikromieszalniki
 - mikroreaktory chemiczne
 - mikrowymienniki ciepła
 - generatory aerozoli i emulsji

Motywacja: biologia i medycyna



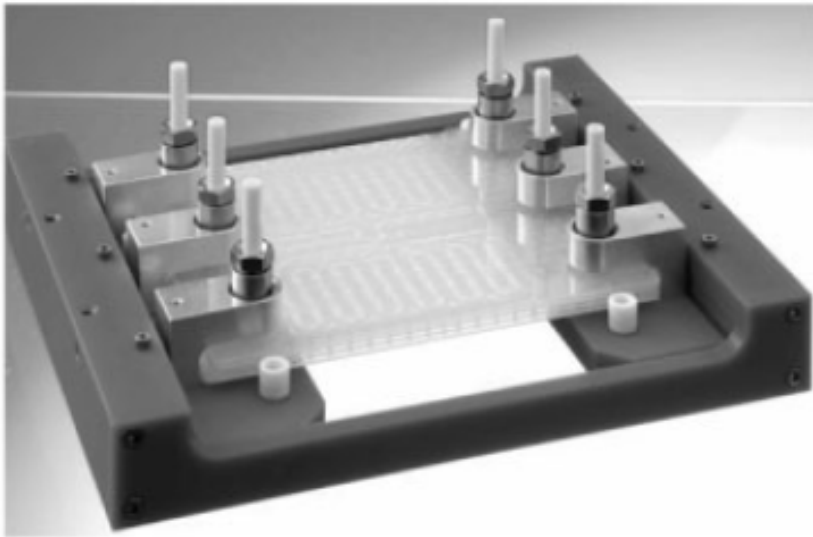
Drug Discovery Today

System podawania leków jako implant jamy ustnej



Drug Discovery Today

Motywacja: chemia i elektronika



Corning microstructure with
efficient cooling

Mikroreaktor chemiczny z
wydajnym układem chłodzenia

D.M. Roberge et. all
„Development of an Industrial Multi-Injection Microreactor for
Fast and Exothermic Reactions – Part II”
Chem. Eng. Technol. 31, No. 8, 1155–1161, 2008

Motywacja

Układy mikroprzepływowe:

- wymiar charakterystyczny: $1\mu\text{m} \div 1\text{mm}$
- duży stosunek powierzchni do objętości \Rightarrow większy wpływ ścianek kanału na strukturę przepływu
- duża względna chropowatość ścianek
- większy wpływ kształtu wlotu na strukturę przepływu



Mogą pojawić się różnice w porównaniu ze skalą makro w:

- strukturze przepływu
- granicy przejścia laminarno – turbulentnego
- oporach przepływu

Przejście laminarno – turbulentne



Drastyczna zmiana parametrów układu:

- intensywność mieszania
- strumień ciepła (układy chłodzenia)
- opory przepływu

Poznanie procesów w skali mikro i określenie charakteru przepływu:

- optymalizacja pracy układów mikroprzepływowych
- intensyfikacja procesów wymiany ciepła i masy

Motywacja: aktualny stan wiedzy

- Wyznaczenie granicy przejścia L-T
- Określenie struktury przepływu w mikrokanale
- Określenie „długości drogi rozwoju” przepływu
- Wpływ parametrów na granicę przejścia L-T:
 - kształt przekroju poprzecznego
 - stosunek wysokości do szerokości kanału
 - długość kanału
 - materiał ścianek kanału
 - chropowatość ścianek kanału
 - rodzaj i właściwości płynu

Liczba Reynoldsa

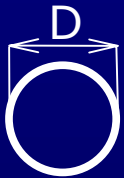
$$\text{Re} = \frac{\rho UL}{\mu} \equiv \frac{UL}{\nu}$$

gdzie: U – prędkość średnia

L – wymiar charakterystyczny

μ - lepkość dynamiczna

ν - lepkość kinematyczna



← $L \equiv D$



← $L = \text{śr. hydrauliczna} \equiv 4wh / 2(w+h)$



← $L \equiv h; \quad (h/w \rightarrow 0)$

krytyczna Liczba Reynoldsa w makroskali

$Re_{kr\ 1}$ \equiv liczba Reynoldsa, poniżej której każde zaburzenie zostanie wygaszone

$Re_{kr\ 2}$ \equiv liczba Reynoldsa, powyżej której każde najmniejsze zaburzenie ulegnie wzmocnieniu

Kanał o przekroju kołowym:

O. Reynolds (1883): $Re_{kr\ 1} = 2260$, $Re_{kr\ 2} = 13.000$

Współczesne pomiary: $Re_{kr\ 1} = 1760$, $Re_{kr\ 2} = 100.000$

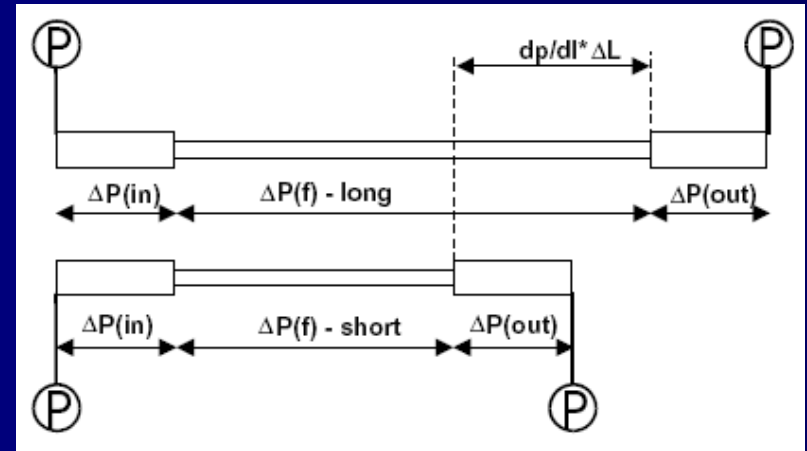
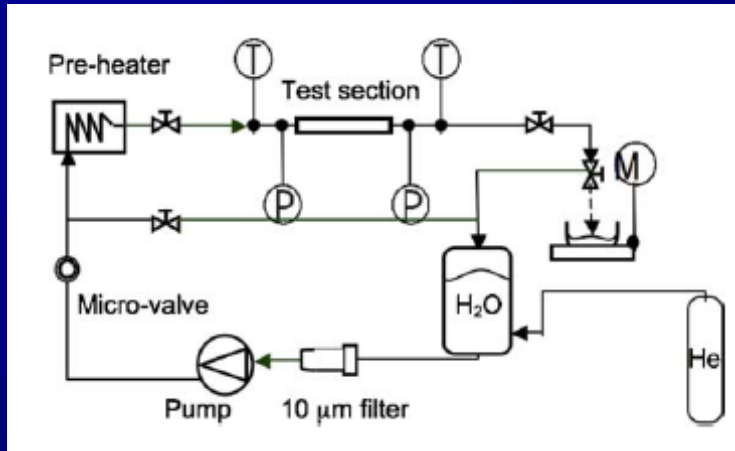
Kanał 2D (przepływ Poiseuille'a pomiędzy dwiema płaszczyznami):

$Re_{kr\ 1} = 2700$, $Re_{kr\ 2} = 5772$

Eksperymentalne metody analizy mikro-przepływów

Eksperymentalne metody analizy mikro-przepływów

Pomiar spadku ciśnienia



$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu l} \Delta P.$$

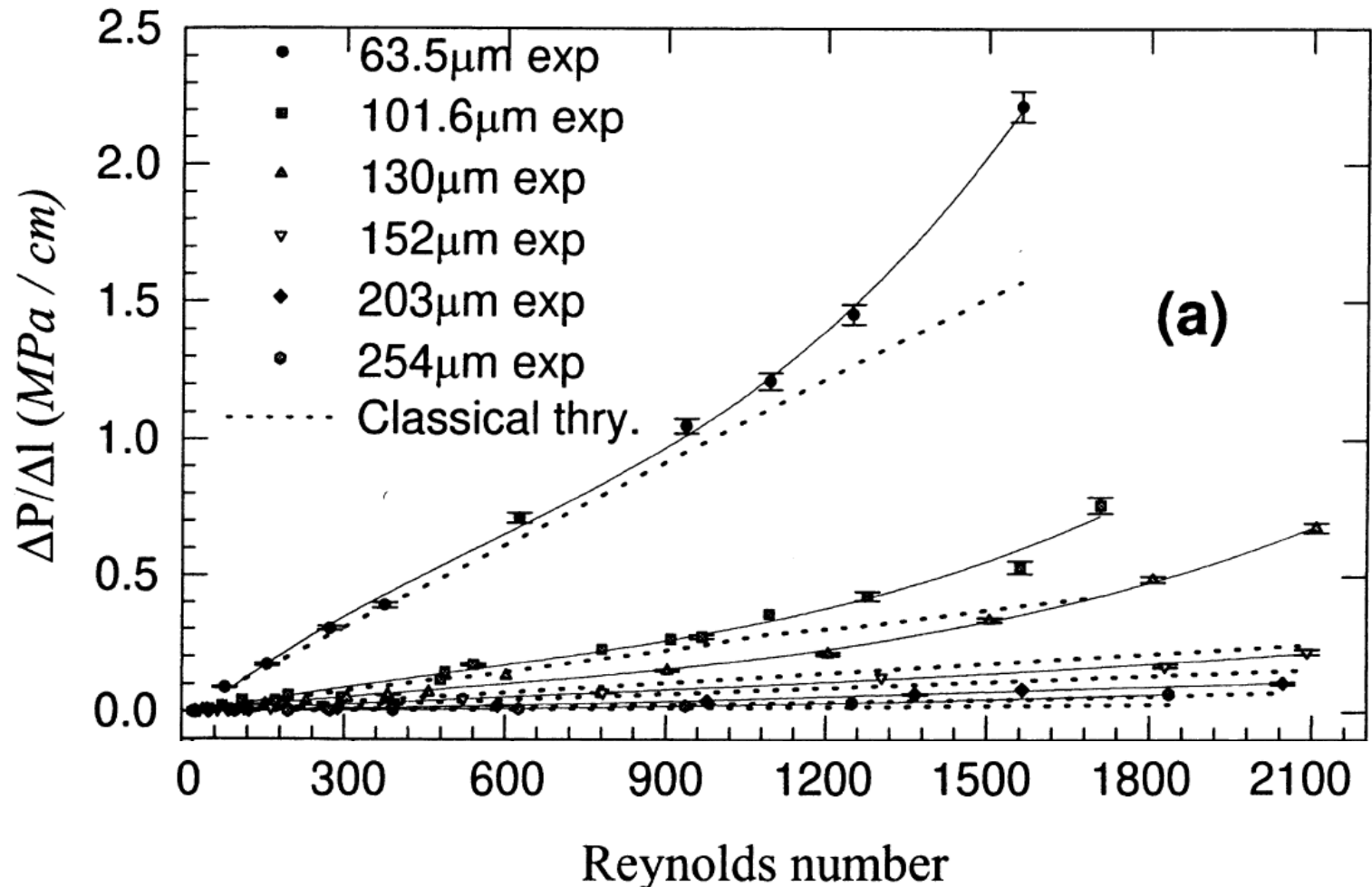
← zależność wydatku objętościowego i spadku ciśnienia w przepływie Poiseuille'a

$$f = 2 \frac{\Delta p}{\Delta L} \frac{d}{\rho u^2}$$

← współczynnik oporów przepływu (wzór Darcy)

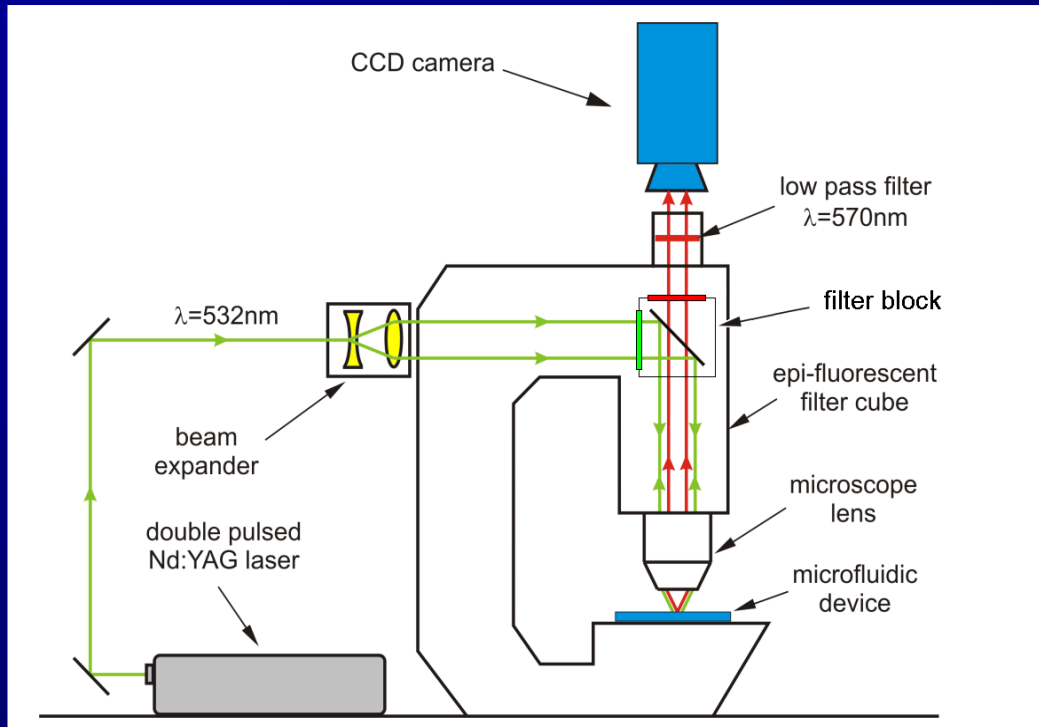
Eksperymentalne metody analizy mikro-przepływów

Pomiar spadku ciśnienia



Eksperymentalne metody analizy mikro-przepływów

Anemometria obrazowa w skali mikro: μ PIV



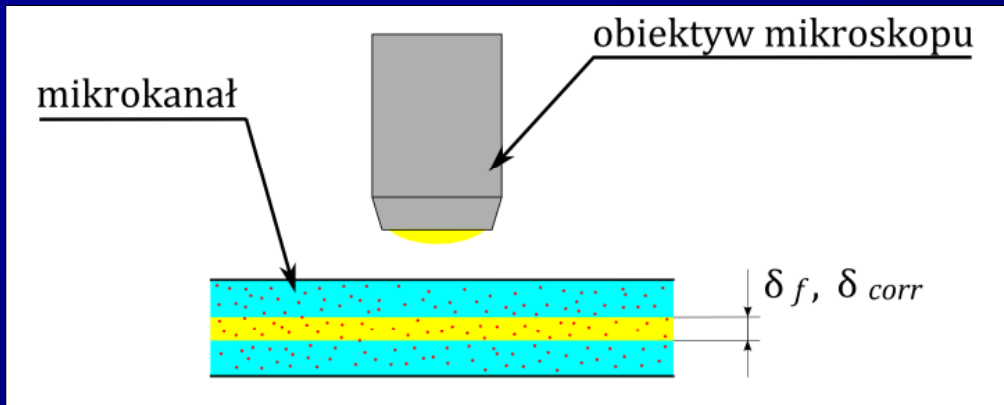
Fluorescencyjne cząstki
znacznikowe ($2\mu\text{m}$)
widziane pod
mikroskopem

Schemat stanowiska mikro-PIV

- Kamera PIV – *PCO SensiCam* (rozdzielczość 1280×1024 , min. $\Delta t = 200\text{ns}$)
- Super szybka kamera CMOS – *PCO 1200.hs* (max. 40720 fps)
- Dwu-impulsowy laser Nd-YAG - *SoloPIV NewWave* (30mJ na impuls)
- Ciągły laser argonowy (5W)

Eksperymentalne metody analizy mikro-przepływów

Oświetlenie w technice μ PIV

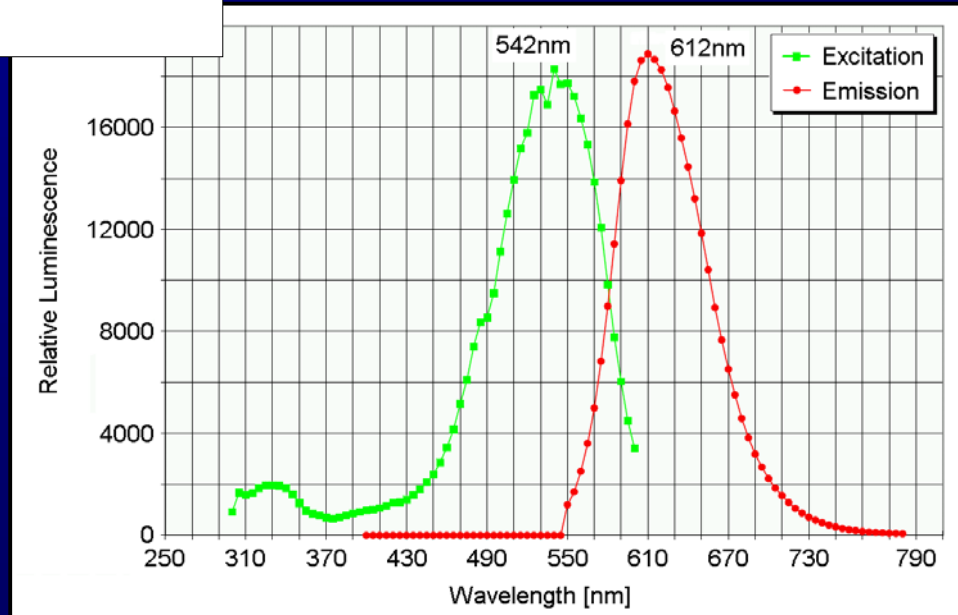


Głębina ostrości i głębina korelacji

$$\delta_f = \frac{n\lambda_0}{(NA)^2} + \frac{n \cdot e}{NA \cdot M},$$

$$\delta_{corr} = \frac{3n\lambda_0}{(NA)^2} + \frac{2.16d_p}{\tan \theta} + d_p,$$

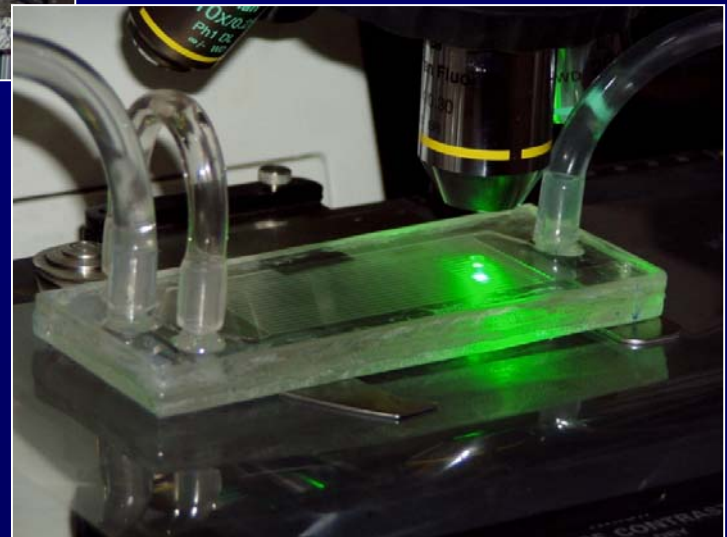
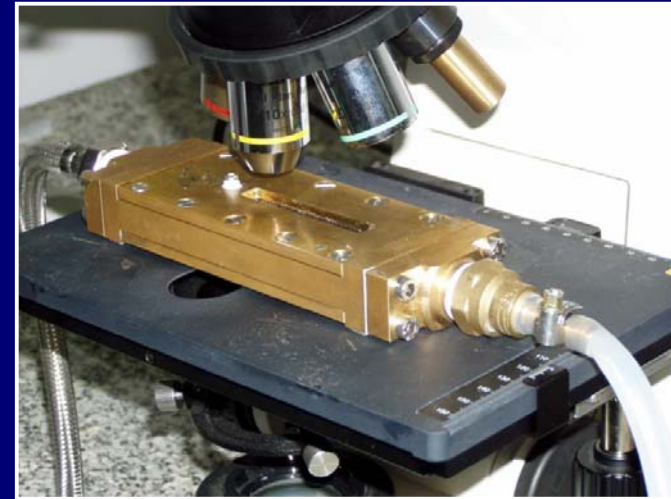
dla obiektywu: 10x, NA=0.3 i światła zielonego, $\delta_{corr} \cong 35\mu\text{m}$



Spektrum wzbudzenia i emisji fluorescencyjnych cząstek znacznikowych

Eksperymentalne metody analizy mikro-przepływów

Stanowisko pomiarowe w technice μ PIV



PCO SensiCam (1280x1024)

CMOS Camera – PCO 1200.hs

Double Pulse Laser Nd-YAG

Hg lamp

Fluorescent tracers 2 μ m

Micropump

Eksperymentalne metody analizy mikro-przepływów

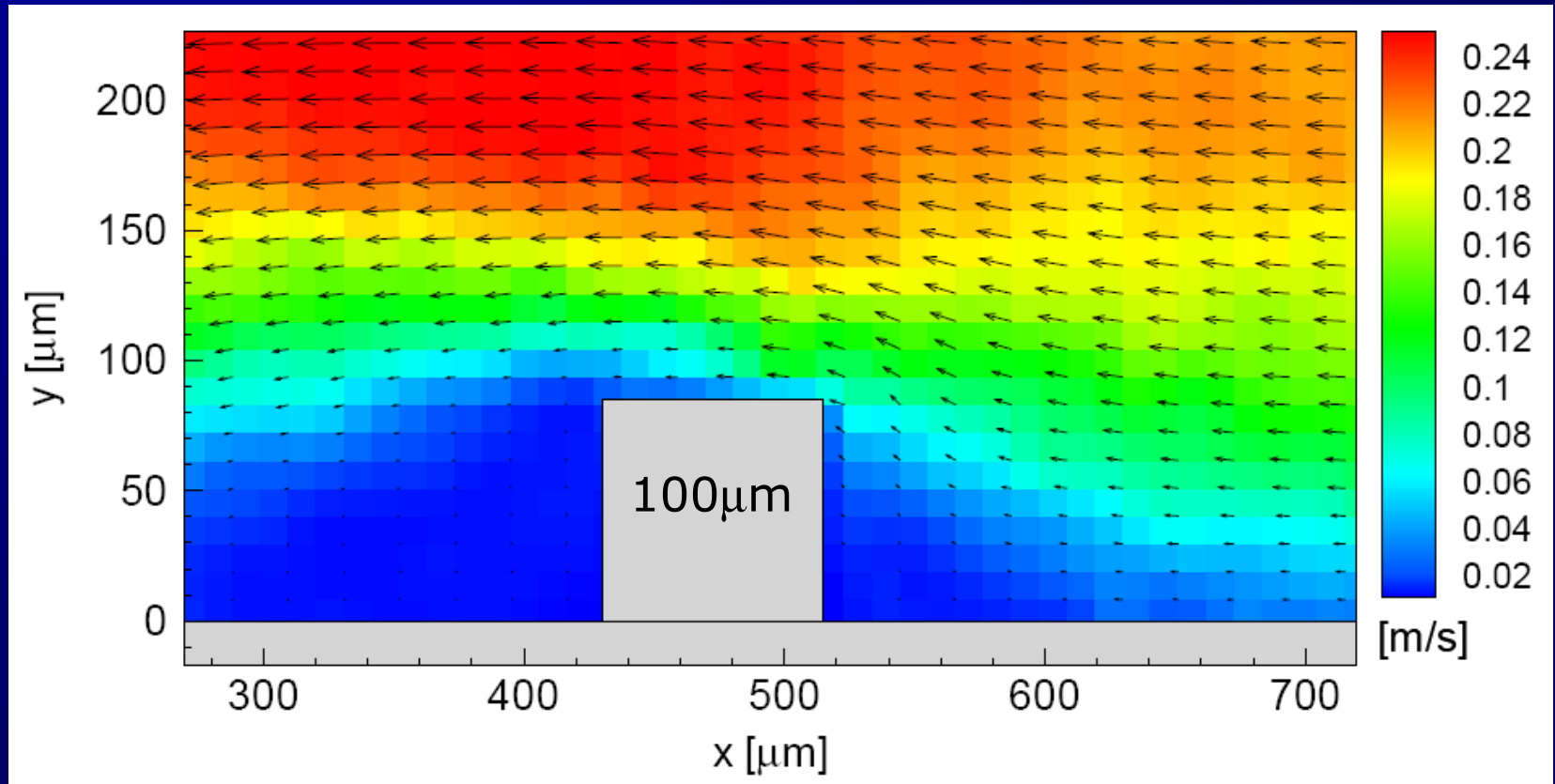
Przykładowe obrazy przepływu w technice μ PIV



$\Delta t = 200\text{ns}$

Eksperymentalne metody analizy mikro-przepływów

Przykładowe wektorowe pole prędkości uzyskane techniką μ PIV



Opływ kwadratowego progu wielkości $100\mu\text{m}$ umieszczonego w mikrokanale

Przejście laminarno-turbulentne
dane literaturowe

Literatura: przejście laminarno-turbulentne

Pierwsze prace wskazywały, że przejście laminarno turbulentne ma miejsce przy liczbach Reynoldsa znacznie niższych niż w skali makro

- Peng, X.F.; Peterson, G.P., Frictional flow characteristics of water flowing through rectangular microchannels, J. Exp. Heat Transfer, Vol.7, Issue 4, pp. 249-264, 1995
- Peng, X.F.; Peterson, G.P., Convective heat transfer and flow friction for water flow in microchannel structures, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 39, Issue 12, 2599-2608, 1996
- Mala, G.M.; Li, D., Flow characteristics of water in microtubes, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 20, Issue 2, 142-148, 1999

Badano przepływ wody przez kapilary o średnicach od $50\mu\text{m}$ do ok. $350\mu\text{m}$

Długość kapilary: $30 \div 100\text{mm}$

Przejście L-T przy $300 < \text{Re} < 1500$

Literatura: przejście laminarno-turbulentne

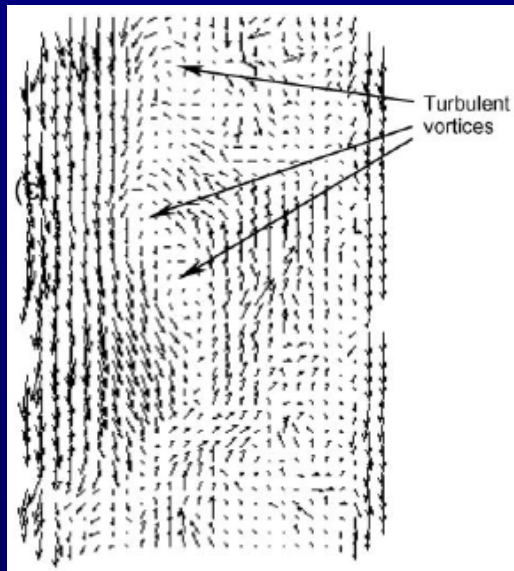
Li, Ewoldt i Olsen (2005) – pomiary μ PIV przepływu wody

Mikrokanał z PDMS: $320 \times 330 \mu\text{m}$, długość: 50mm, $D_h = 325 \mu\text{m}$

liczba Reynoldsa: $272 < Re < 2853$

Na podstawie fluktuacji $\langle u' \rangle / u_{\text{max}}$ wyznaczono:

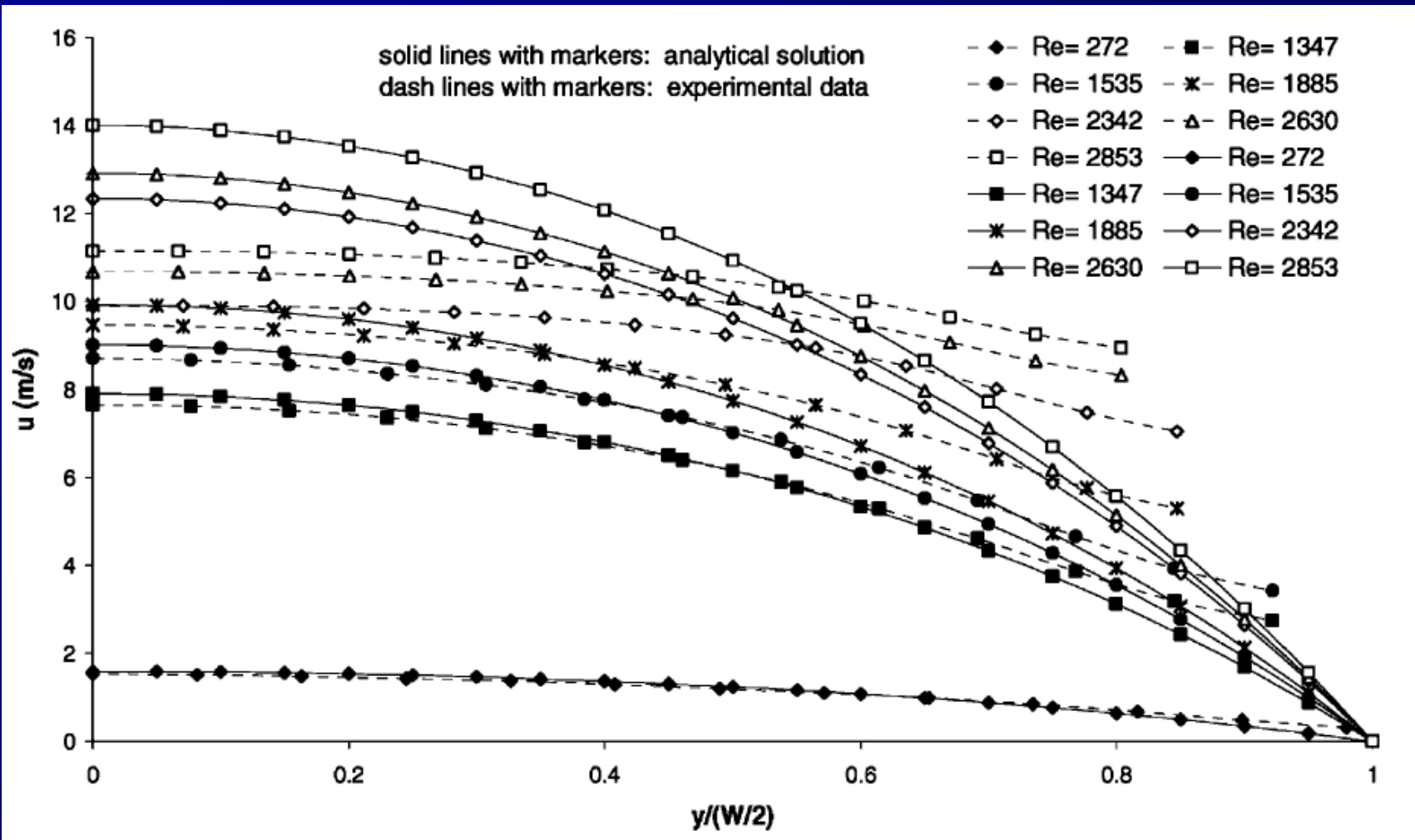
- krytyczną liczbę Reynoldsa $Re_{\text{kr}} = 1535$
- w pełni rozwinięty przepływ turbulentny dla $2630 < Re < 2853$



Chwilowe pole prędkości
 $Re = 2853$

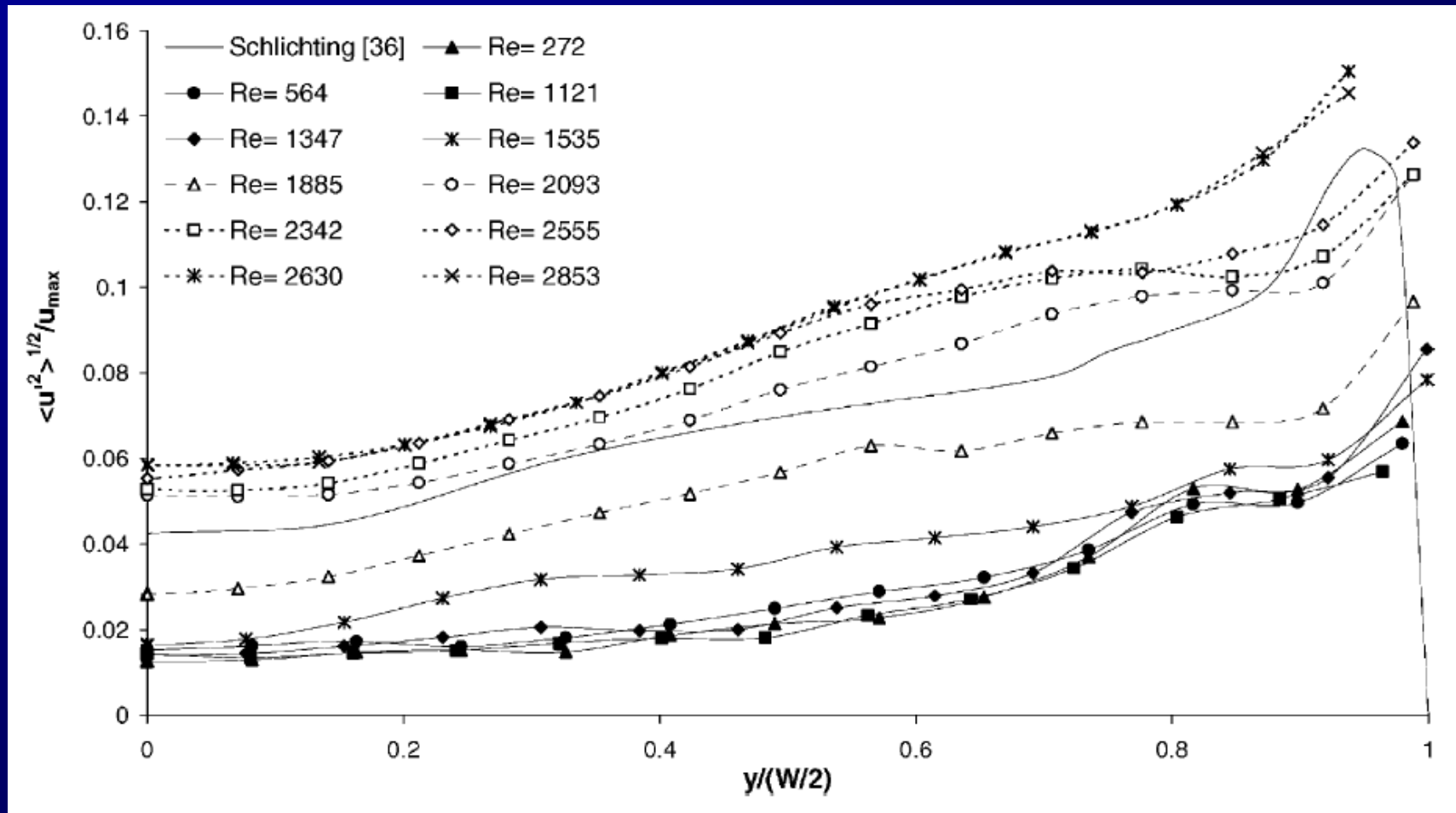
Literatura: przejście laminarno-turbulentne

Profile prędkości: wyznaczone eksperymentalnie i analitycznie



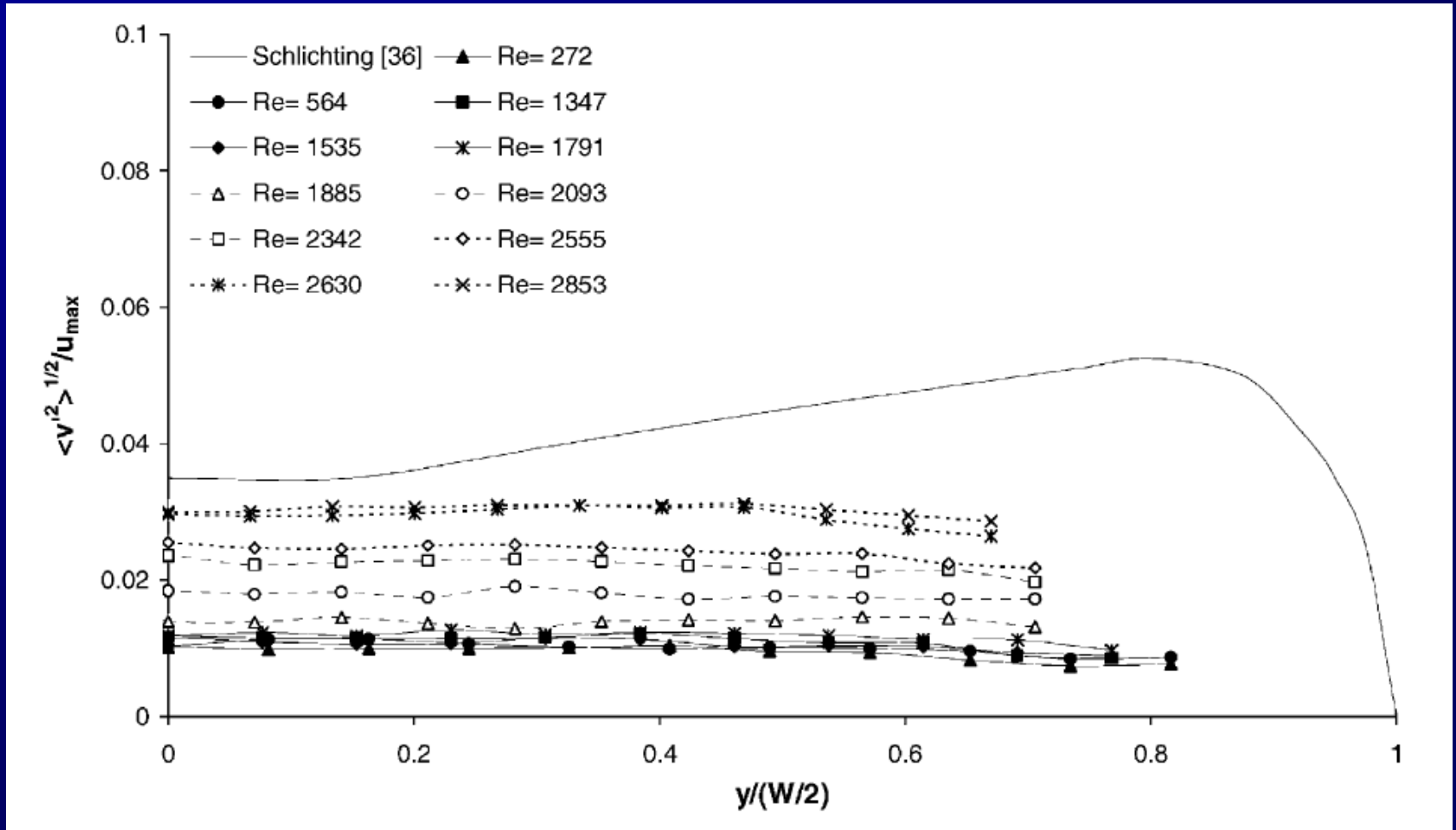
Literatura: przejście laminarno-turbulentne

Znormalizowany profil fluktuacji wzdłużnych prędkości



Literatura: przejście laminarno-turbulentne

Znormalizowany profil fluktuacji poprzecznych prędkości

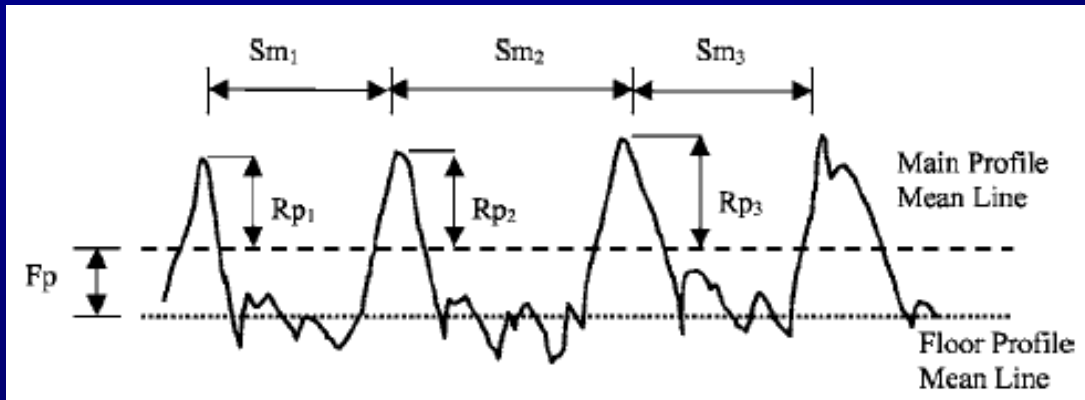


Literatura: przejście laminarno-turbulentne

Kandlikar (2005) przeanalizował wpływ chropowatości ścianek kanału na spadek ciśnienia w przepływie przez kanał o wymiarach 10.03 x 100mm

Średnica hydrauliczna kanału: $325\mu\text{m} \div 1819\mu\text{m}$

Liczba Reynoldsa: $Re=200 \div 5700$



$$R_{Sm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{m_i}$$

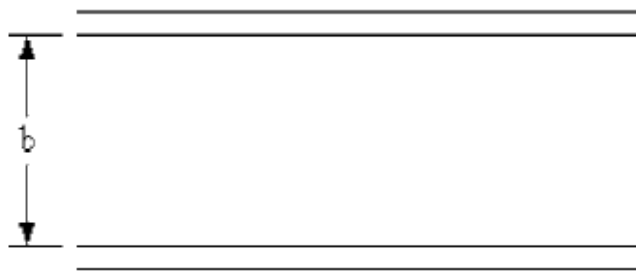
Chropowatość: $\varepsilon = R_p + F_p$

Chropowatość względna: ε/D

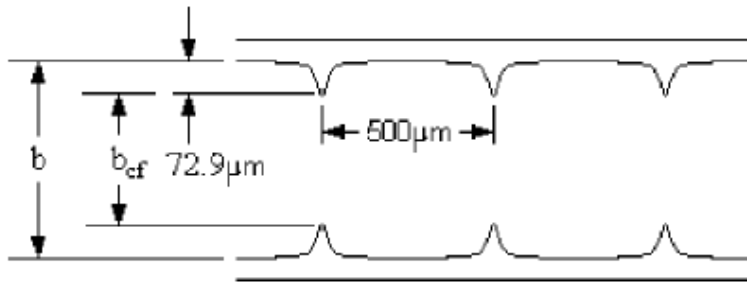
W mikrokanałach: chropowatość względna bardzo duża!

Zaobserwowano spadek krytycznej liczby Reynoldsa wraz ze wzrostem względnej chropowatości

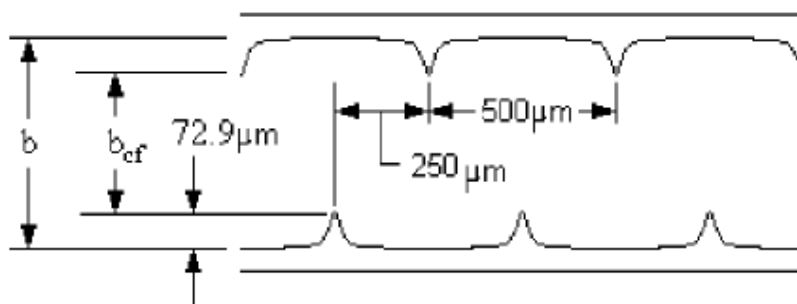
Literatura: przejście laminarno-turbulentne



Kanał gładki

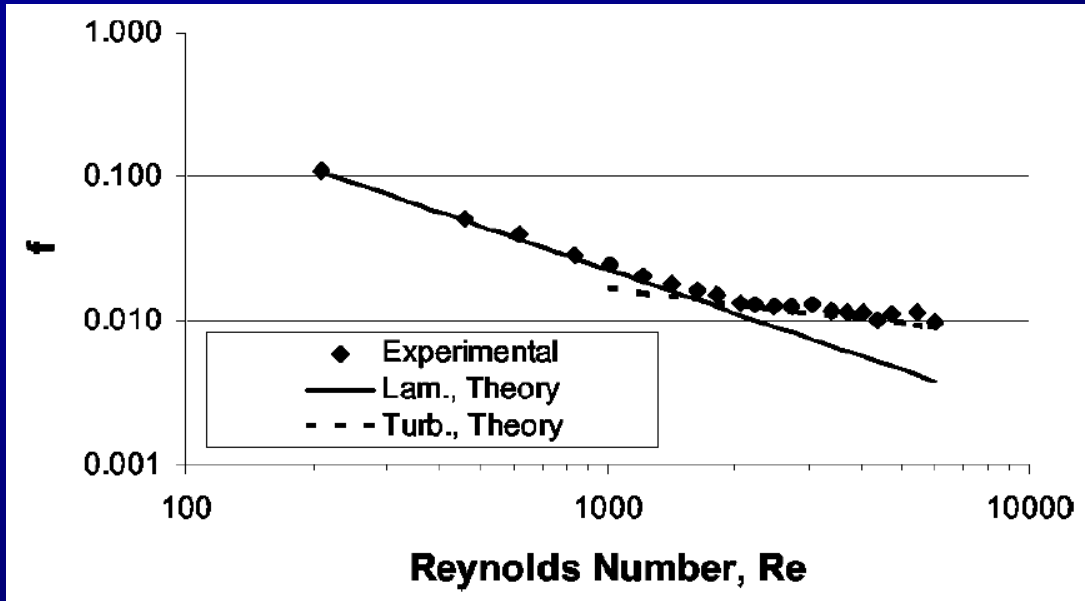


Kanał chropowaty
„bez przesunięcia”



Kanał chropowaty
„z przesunięciem”

Literatura: przejście laminarno-turbulentne



Kanał gładki

$D_h = 953 \mu\text{m}$

$b = 500 \mu\text{m}$

Różnica Exp.-Theory < 3%

$Re_{kr} = 1950$

$f = \frac{C}{Re}$, ← wsp. tarcia dla przepływu laminarnego, $C = 22.5$

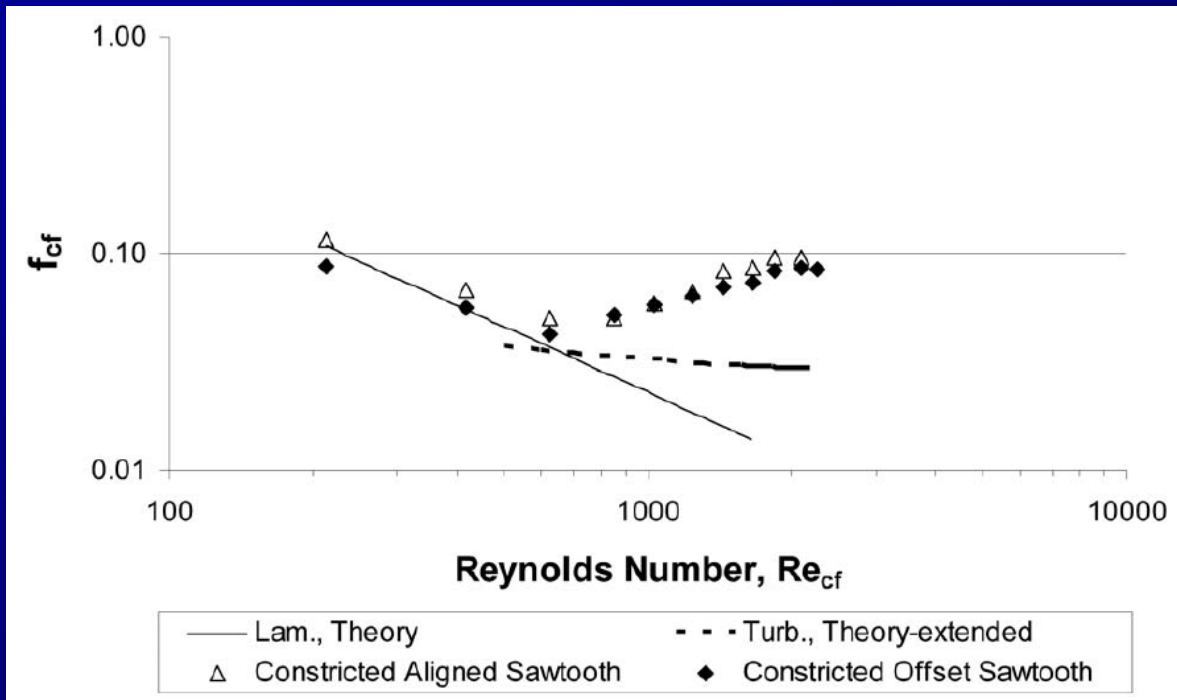
$$C = 24(1 - 1.3553\alpha^* + 1.9467\alpha^{*2} - 1.7012\alpha^{*3} + 0.9564\alpha^{*4} - 0.2537\alpha^{*5}).$$

$\alpha^* = \text{wys. kanału} / \text{szer. kanału}$

$$f = \frac{0.25 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon/D_h}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^{-2}}{4}.$$

← wsp. tarcia dla przepływu turbulentnego

Literatura: przejście laminarno-turbulentne



Kanał chropowaty

$$D_{h,cf} = 684 \mu\text{m}$$

$$\varepsilon/D_{h,cf} = 11\%$$

$$Re_{kr} = 800$$

$$f = \frac{C}{Re}, \quad \leftarrow \text{wsp. tarcia dla przepływu laminarnego}$$

$$C = 24(1 - 1.3553\alpha^* + 1.9467\alpha^{*2} - 1.7012\alpha^{*3} + 0.9564\alpha^{*4} - 0.2537\alpha^{*5}).$$

$\alpha^* = \text{wys. kanału} / \text{szer. kanału}$

$$f = \frac{0.25 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon/D_h}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^{-2}}{4}.$$

\leftarrow wsp. tarcia dla przepływu turbulentnego

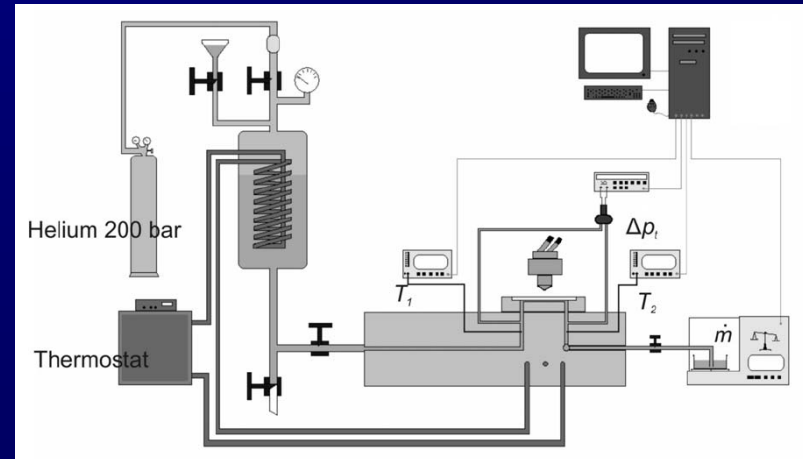
Najnowsze prace nie wskazują wyraźnych różnic pomiędzy strukturą przepływu i granicą przejścia laminarno-turbulentnego w skali mikro i makro

- Sharp, K.V.; Adrian, R.J., Transition from laminar to turbulent flow in liquid filled microtubes, *Experiments in Fluids*, Vol. 36, Issue 5, pp. 741–747, 2004
- Celata, G.P.; Cumo, M.; McPhail, S.; Zummo, G., Characterization of fluid dynamic behaviour and channel wall effects in microtube, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 27, Issue 1, 135-143, 2006
- Wibel, W.; Ehrhard, P., Experiments on liquid pressure-drop in rectangular microchannels, subject to non-unity aspect ratio and finite roughness, *Proc. Int. Conf. Nano-, Micro-, Minichannels (ICNMM2006)*, Limerick, Ireland, June 19-21, 2006, no. 96116
- C. Rands, B.W. Webb, D. Maynes, Characterization of transition to turbulence in microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 2924–2930, 2006
- Wibel, W.; Ehrhard, P., Experiments on the laminar/turbulent transition of liquid flows in rectangular microchannels, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 30, Issue 1-2, pp. 70-77, 2009

Literatura: przejście laminarno-turbulentne

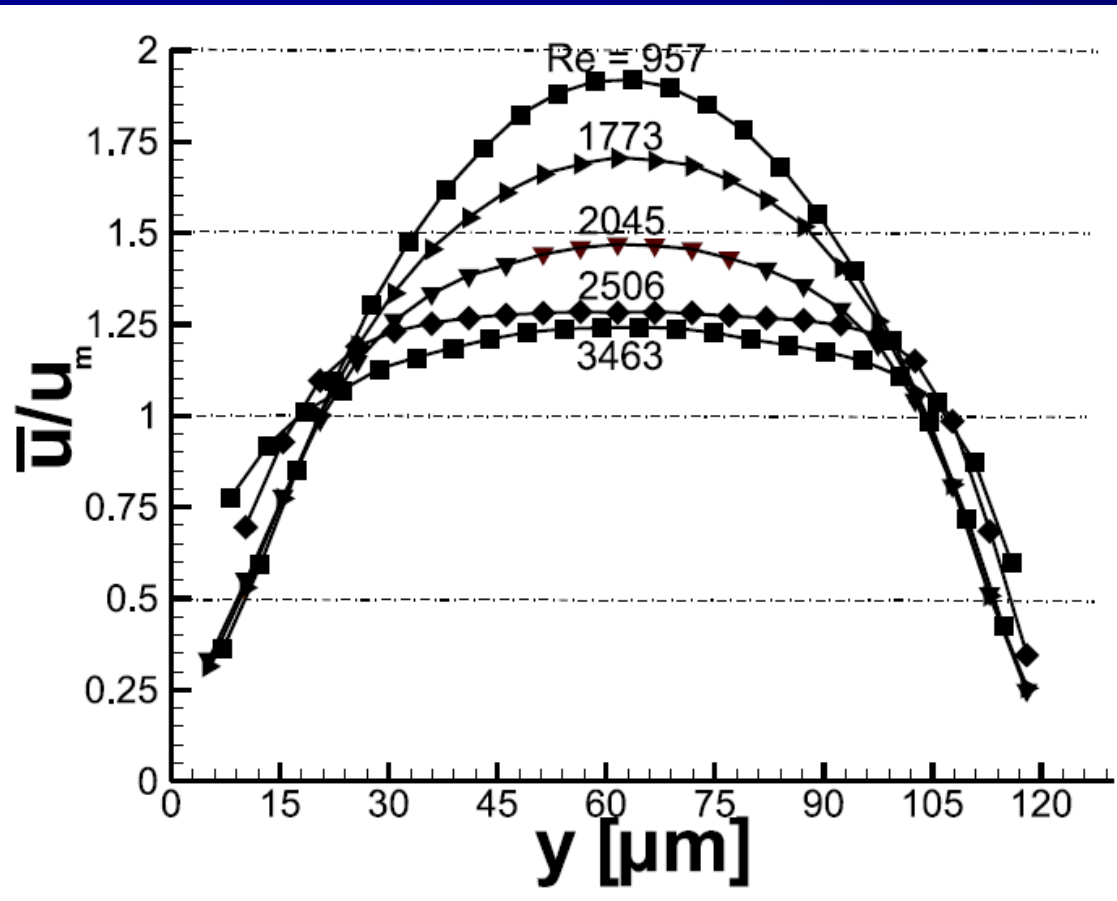
Wibel i Ehrhard (2009): brak różnic ze skalą makro!

- pomiary μ PIV
- mikrokanal o przekroju prostokątnym: 1:1, 1:2, 1:5
- stała średnica hydrauliczna: $133\mu\text{m}$, długość: 27mm
- chropowatość: $<0.9\mu\text{m} \Rightarrow$ chropowatość względna $<0.7\%$ (kanał gładki)
- Pomiary prowadzono 25mm od wlotu
- $\Delta p_{\text{max}} = 20\text{bar} \Rightarrow Re_{\text{max}} = 4000$
- Wyznaczono dla kanału:
 - (1:1): $Re_{\text{kr}} = 1900 - 2200$
 - (1:2): $Re_{\text{kr}} = 1950 - 2700$
 - (1:5): $Re_{\text{kr}} = 2300 - 3400$



Literatura: przejście laminarno-turbulentne

Znormalizowany, w pełni rozwinięty profil prędkości średniej (kanał 1:1)

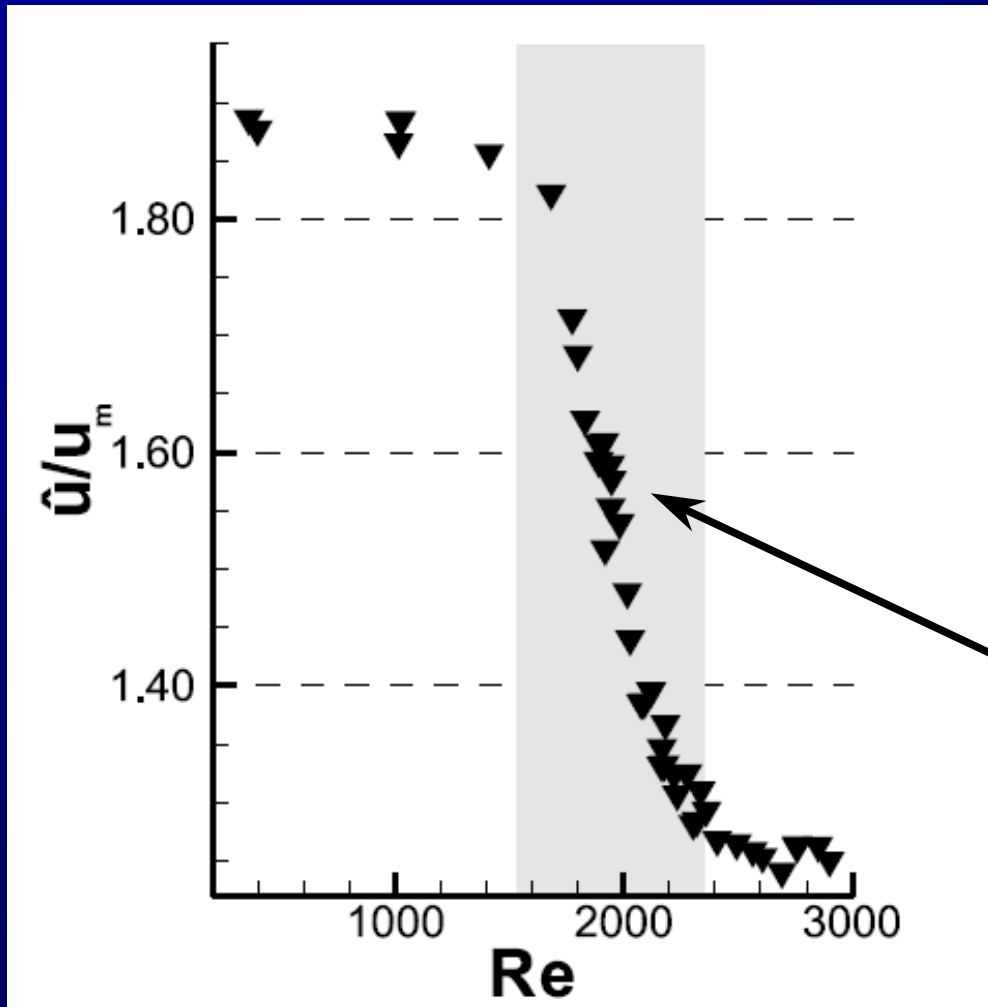


\bar{u} - średnia czasowa prędkości

u_m - średnia po przekroju (wyznaczona z wydatku)

Literatura: przejście laminarno-turbulentne

Znormalizowana wartość prędkości na osi symetrii (kanał 1:1)



\hat{u} - prędkości na osi kanału

u_m - średnia po przekroju (wyznaczona z wydatku)

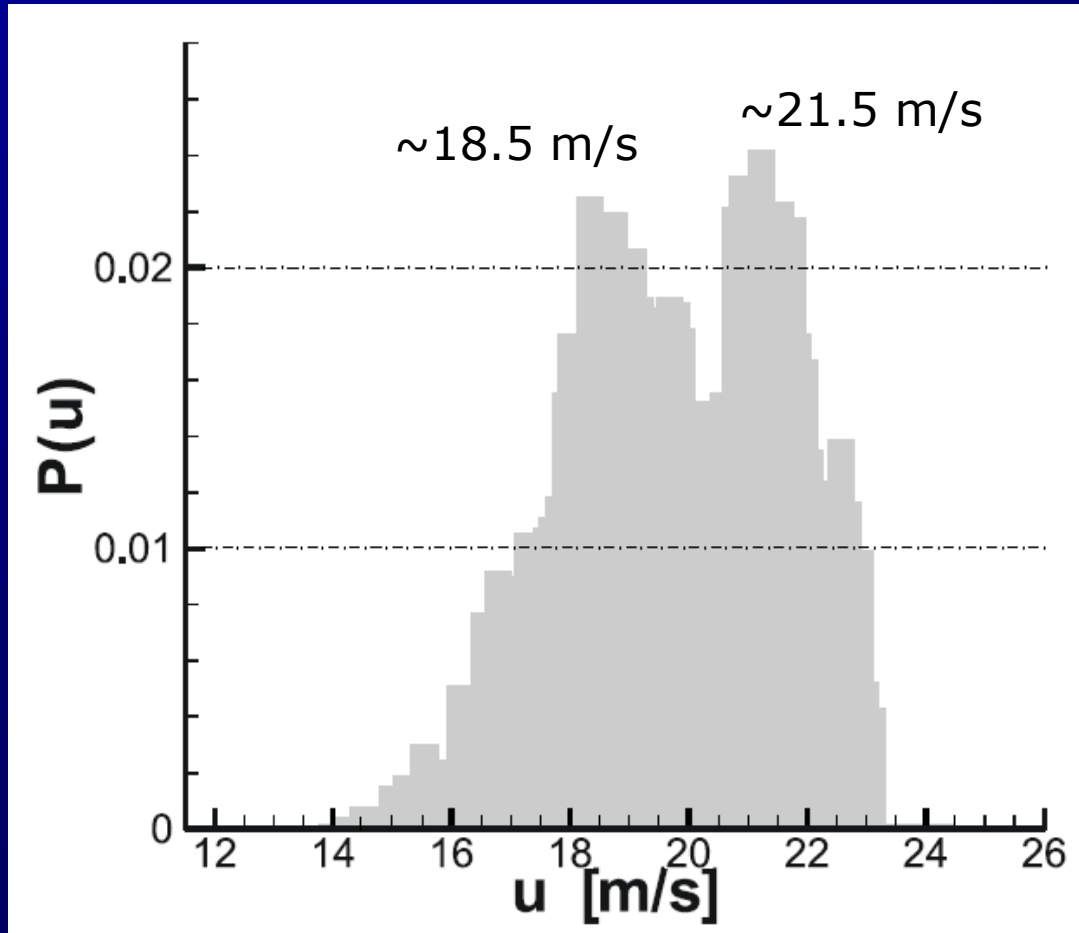
obszar intermitencji

Literatura: przejście laminarno-turbulentne

Gęstość prawdopodobieństwa w wybranym punkcie na osi symetrii kanału

Re = 2113

kanał 1:1

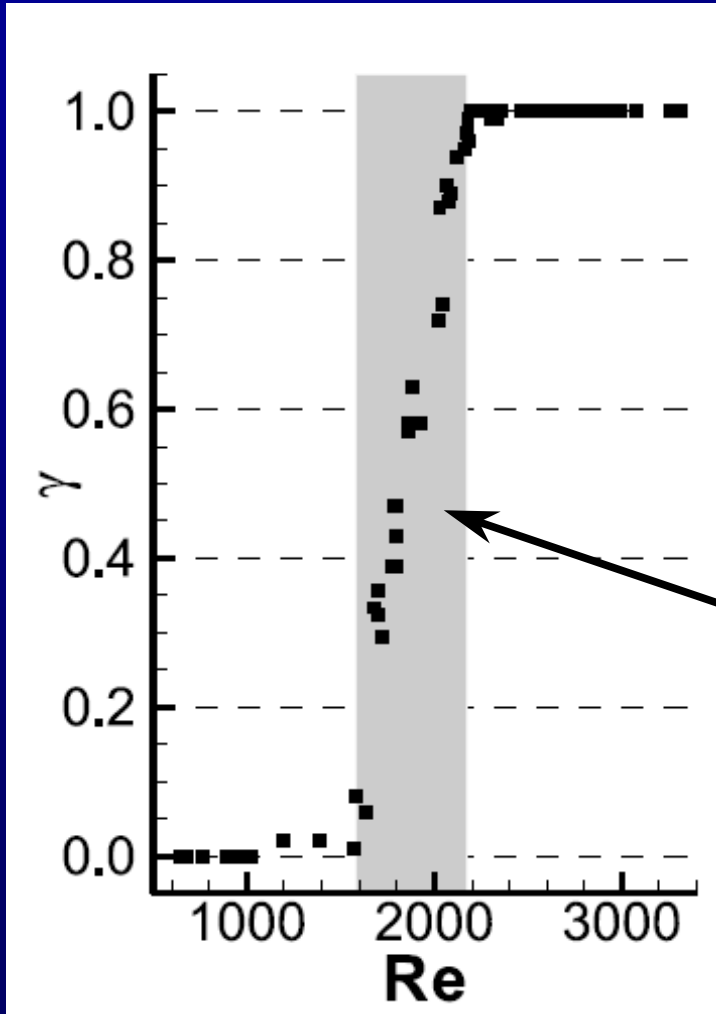


21.5 m/s – reżim laminarny

18.5 m/s – reżim turbulentny

Literatura: przejście laminarno-turbulentne

Współczynnik intermitencji na osi symetrii kanału (kanał 1:1)

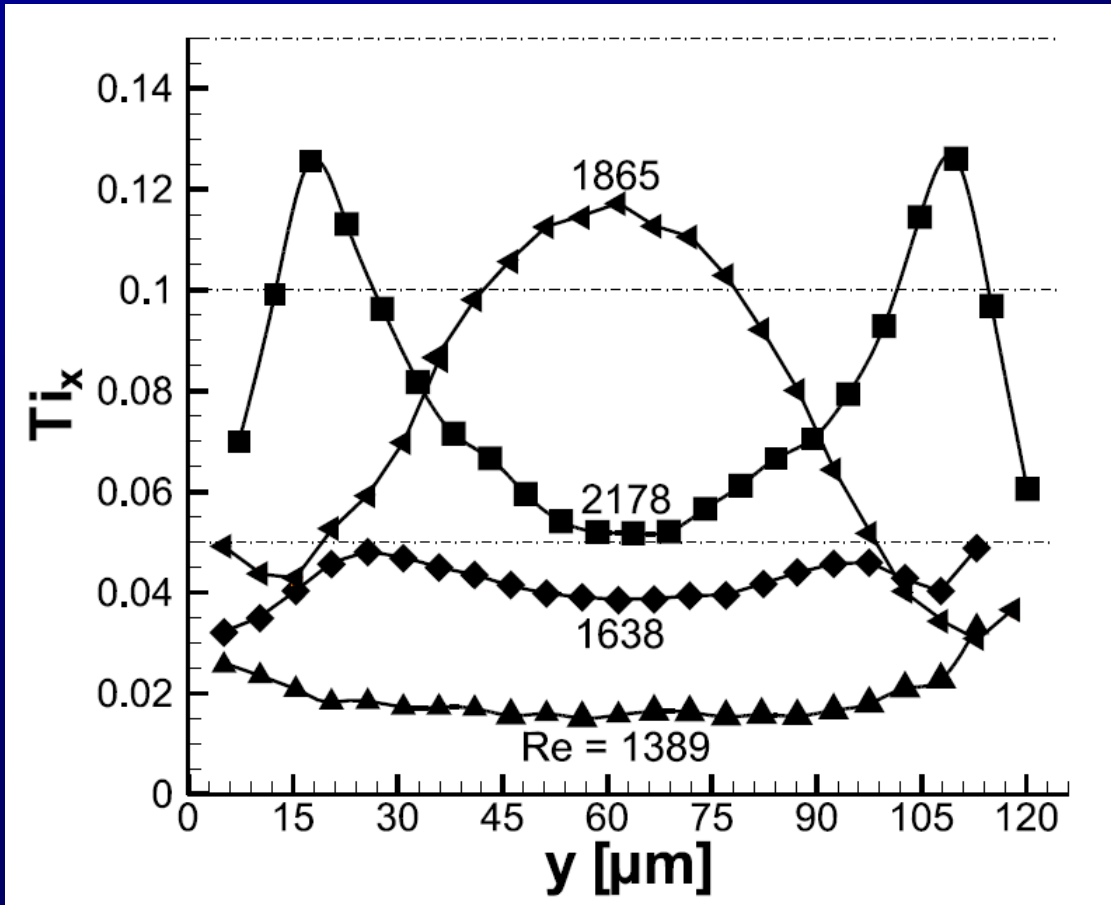


$$\gamma = \sum \Delta t_{tur,i} / \Delta t_{tot}$$

obszar intermitencji

Literatura: przejście laminarno-turbulentne

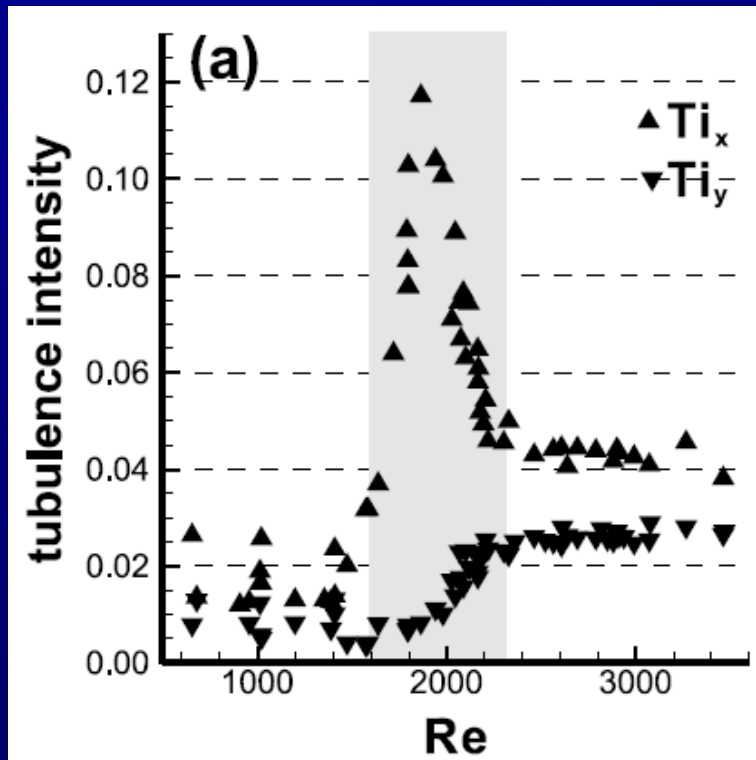
Profil wzdłużnej intensywności turbulencji Ti_x (kanał 1:1)



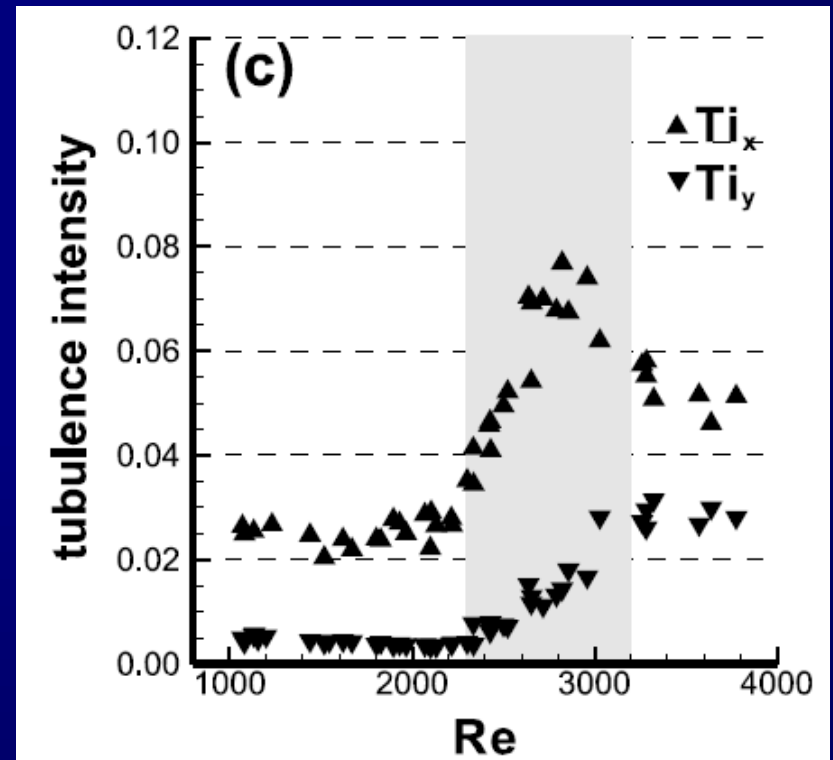
$$Ti_x = \frac{\sqrt{u'^2}}{\hat{u}}$$

Literatura: przejście laminarno-turbulentne

Profile wzdłużnej Ti_x i poprzecznej Ti_y intensywności turbulencji



kanał 1:1



kanał 1:5

$$Ti_x = \frac{\sqrt{u'^2}}{\hat{u}} \quad , \quad Ti_y = \frac{\sqrt{v'^2}}{\hat{u}}$$

Analiza przepływu turbulentnego w mikrokanale (prace własne)

- brak wyraźnych różnic pomiędzy strukturą przepływu w skali mikro i makro
- brak wyraźnych różnic pomiędzy granicą przejścia L-T w skali mikro i makro
- odejście od przekroju kwadratowego mikrokanału (1:1) powoduje przesunięcie granicy przejścia L-T w kierunku wyższych Re i rozszerzenie przedziału intermitentnego
- duża chropowatość względna ($>10\%$) powoduje wzrost oporów przepływu przez mikrokanal i spadek krytycznej liczby Reynoldsa

Analiza przepływu turbulენტnego w mikrokanale

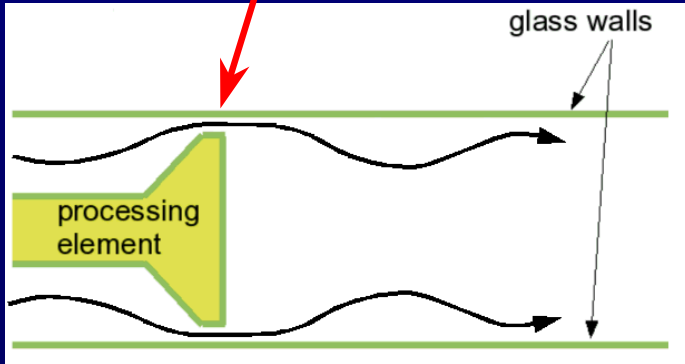
Rozpatrzono przepływ w układzie mikroprzepływowym:

- o małym stosunku szerokości do wysokości: $\alpha^* = 0.4/15 \approx 0.027$
- małej długości: 1mm

Zastosowania techniczne:

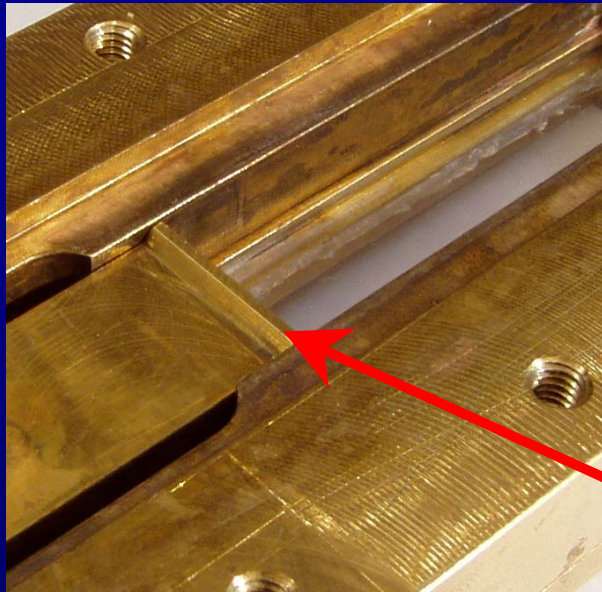
- wytworzenie pola prędkości z silnymi naprężeniami ścinającymi
- tworzenie jednorodnych emulsji

mikro-kanal 400 μ m wysokości

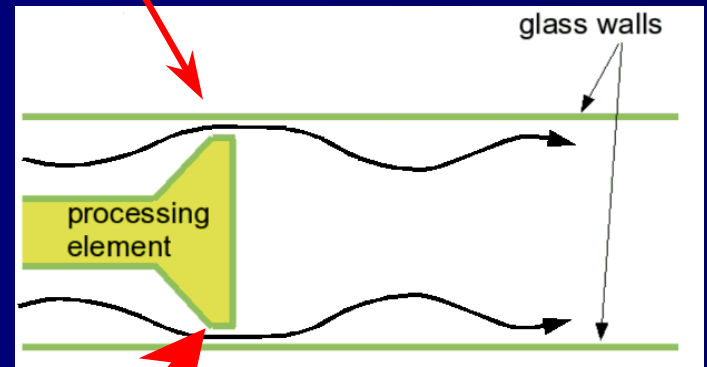


Geometria emulsyfikatora

Model emulsyfikatora z optycznym dostępem do jego wnętrza



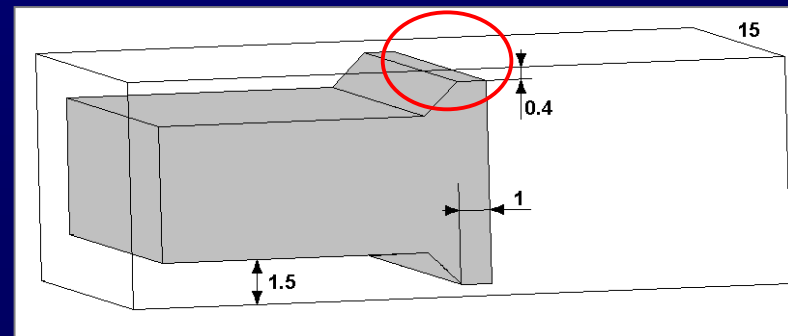
mikro-kanal



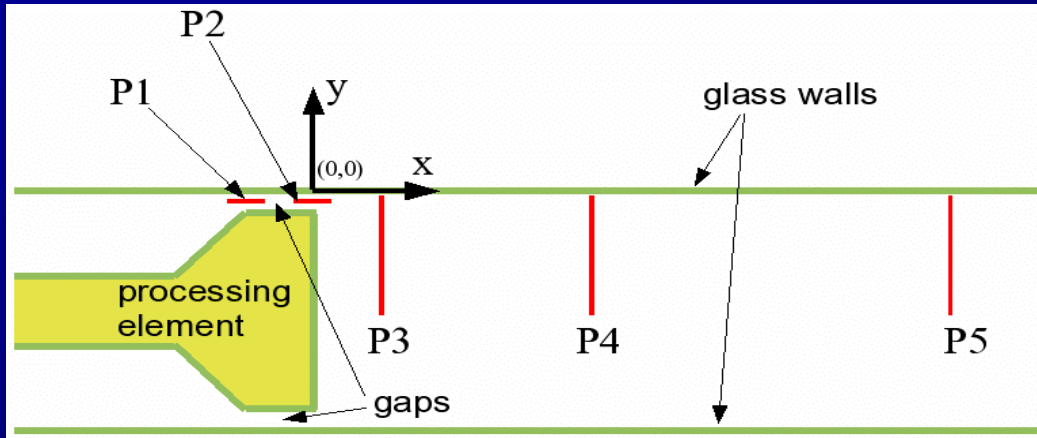
Szczelina: $400\mu\text{m} \times 1\text{mm} \times 15\text{mm}$

Wydatek: do $0.204 \text{ dm}^3/\text{s}$

Liczba Reynoldsa w szczelinie: do 6770



Analiza eksperymentalna – mikro-PIV



Schematyczny przekrój emulsyfikatora z przyjętym układem współrzędnych i pozycją obszarów pomiarowych

Profil	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
P1	-1.45 ÷ -0.7	-0.2	0
P2	-0.35 ÷ 0.35	-0.2	0
P3	1	0 ÷ -3.75	0
P4	3	0 ÷ -3.75	0
P5	8	0 ÷ -3.75	0

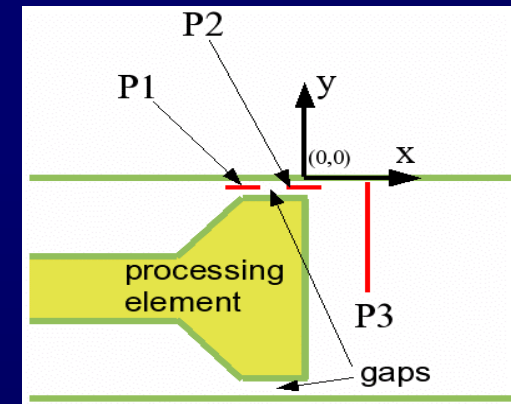
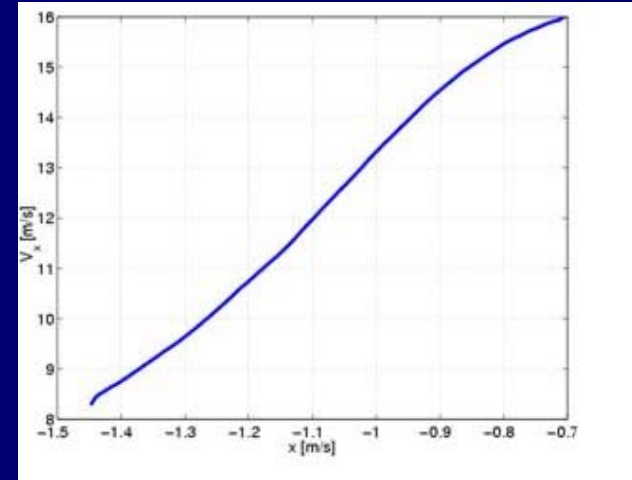
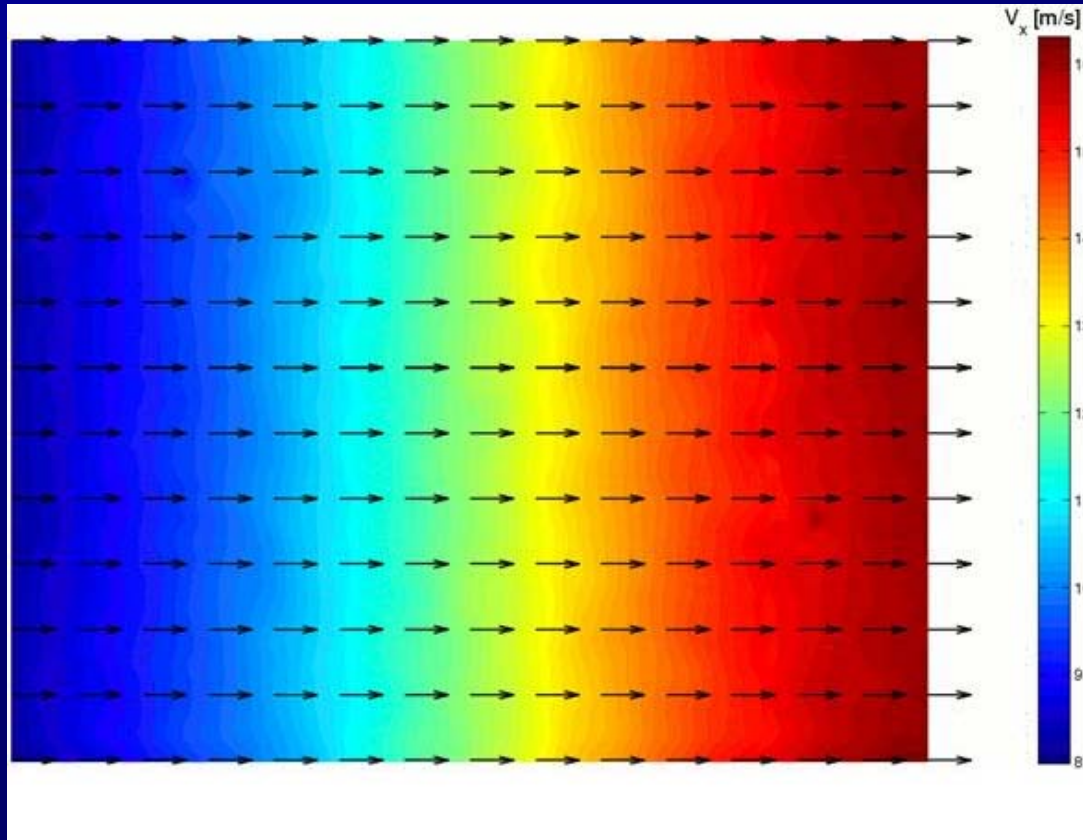
Cząstki znacznikowe:
cząstki fluorescencyjne o średnicy 2 μ m

Obiektyw mikroskopu:
10x/NA0.3/WD17.30mm

Szerokość rejestrowanych obrazów wynosi 0.7mm

Mikro-PIV – wyniki pomiarów

Pole prędkości: wlot do szczeliny



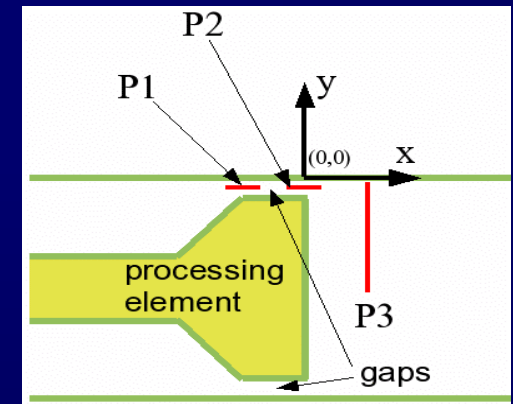
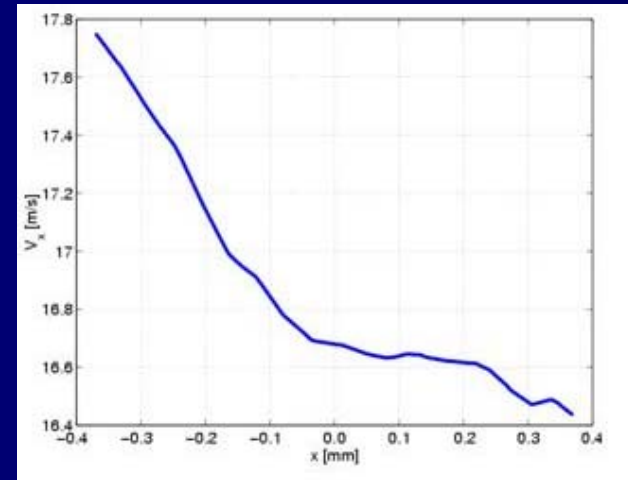
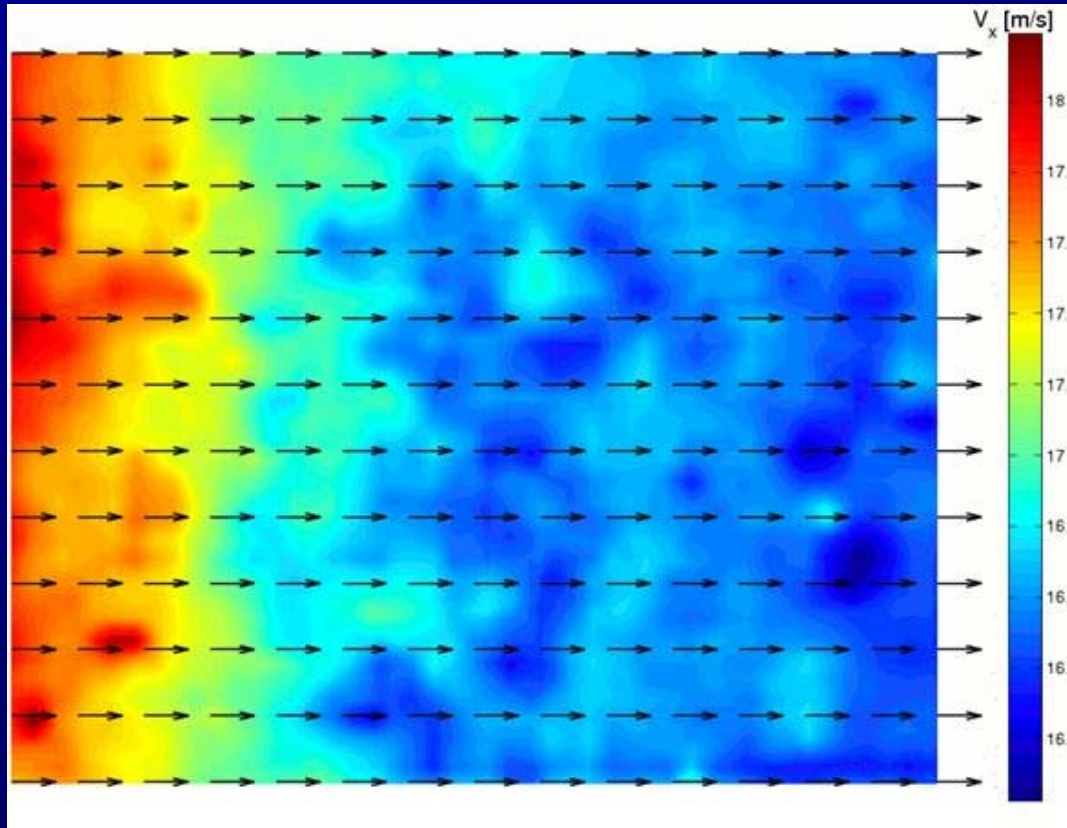
Położenie P1

Wydatek: $Q = 0.204 \text{ dm}^3/\text{s}$

$Re = 6770$

Mikro-PIV – wyniki pomiarów

Pole prędkości: wylot ze szczeliny



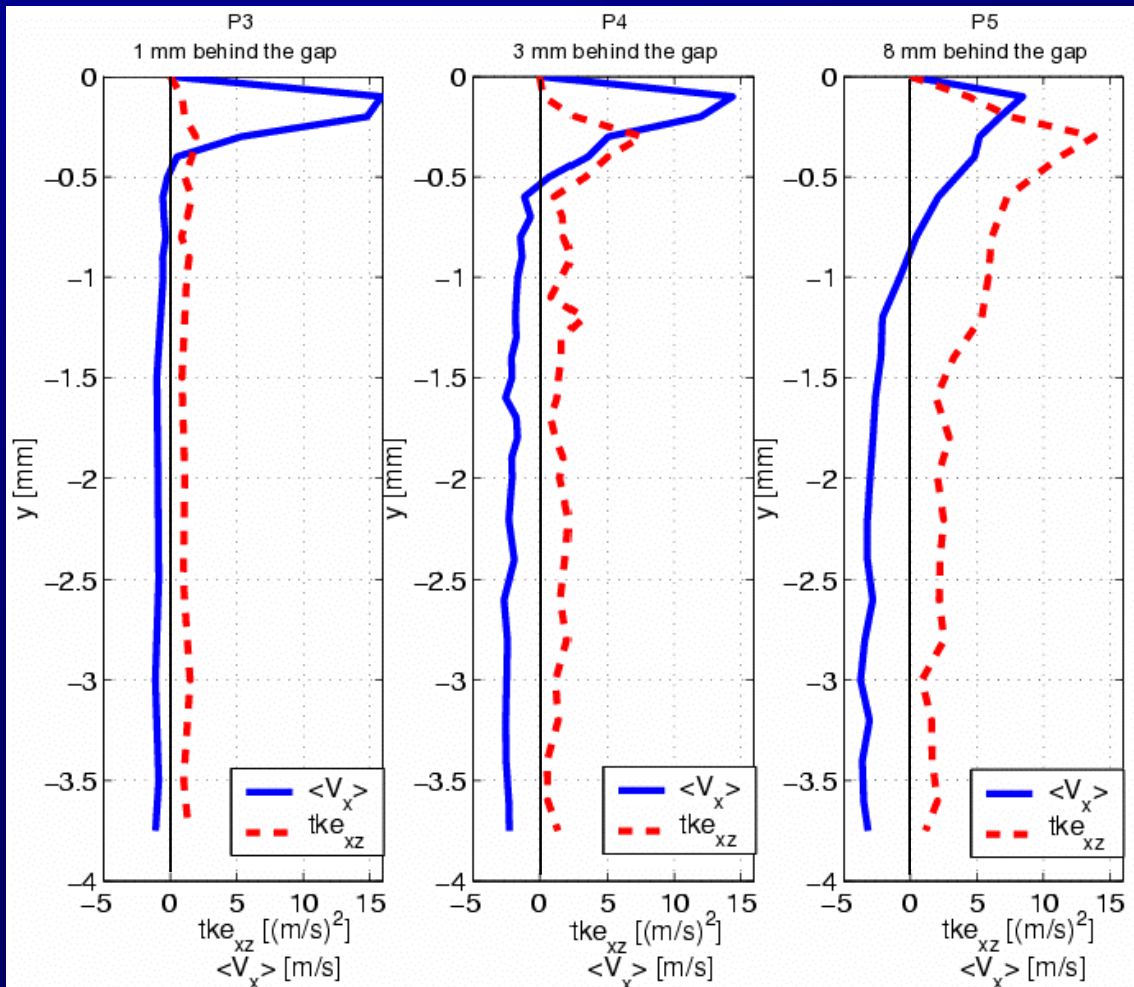
Położenie P2

Wydatek: $Q = 0.204 \text{ dm}^3/\text{s}$

$Re = 6770$

Mikro-PIV – wyniki pomiarów

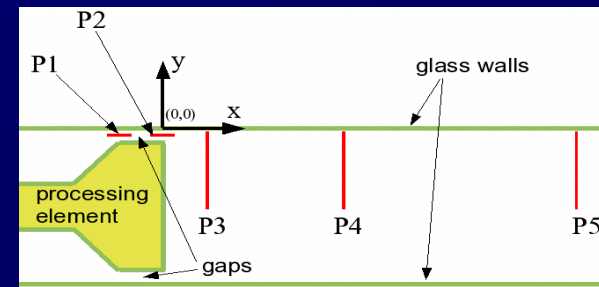
Profile P3, P4 i P5 prędkości V_x i średnia energia kinetyczna turbulencji (xz)



$$V_x = \langle V_x \rangle + V'_x$$

$$V_z = \langle V_z \rangle + V'_z$$

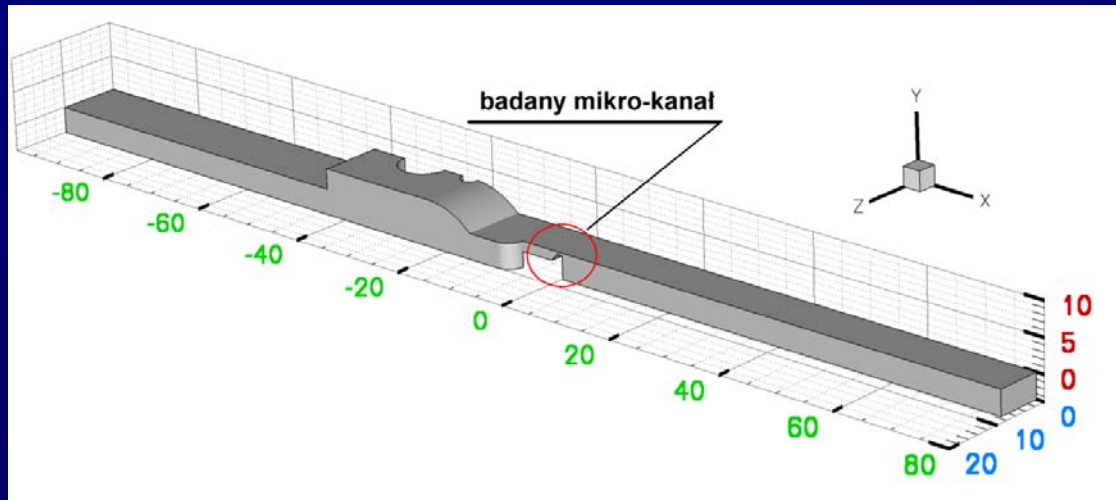
$$tke_{xz} = \langle V'^2_x \rangle + \langle V'^2_z \rangle$$



Symulacja numeryczna

Pakiet obliczeniowy: Fluent (Ansys nc.)

- symulacja DNS \Rightarrow dokładne, niestacjonarne rozwiązania niezmodyfikowanych równań Naviera-Stokesa \Rightarrow pełna, czasowa i przestrzenna skala turbulencji
- użycie modelu $k-\varepsilon$ \Rightarrow prędkość średnia oraz intensywność dyssypacji energii turbulencji



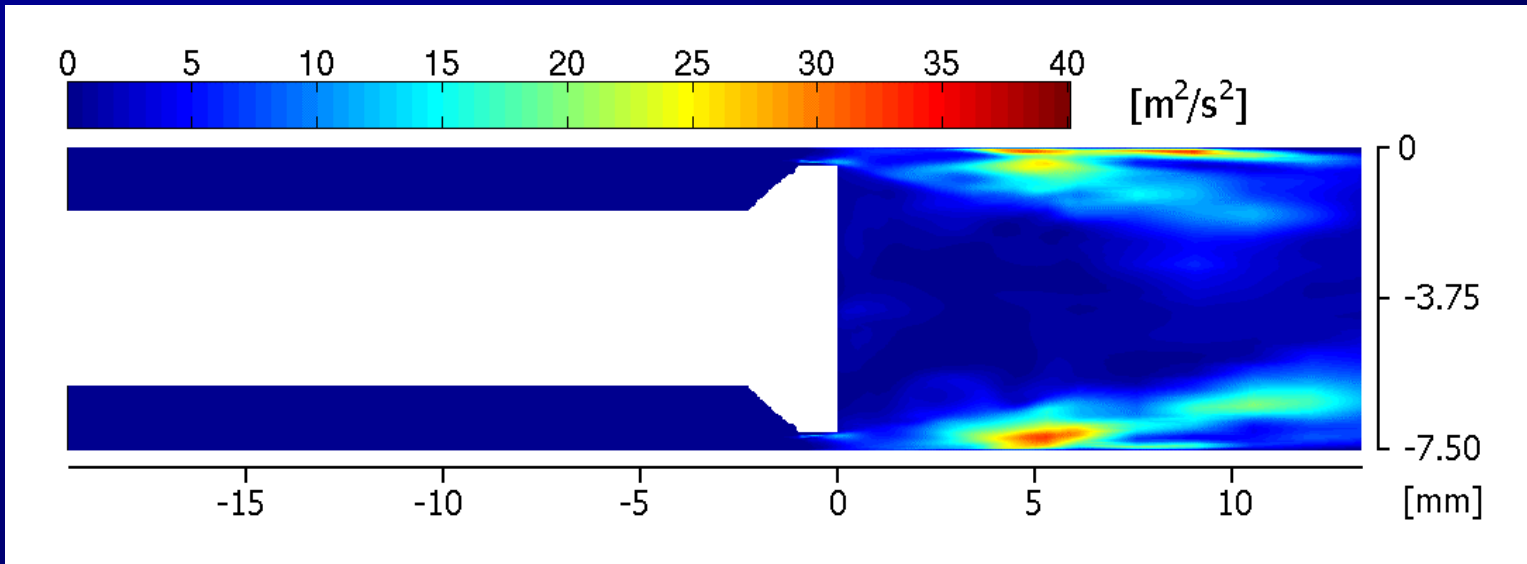
Geometria – identyczna z eksperymentem

$k-\varepsilon$ - obliczenia w $\frac{1}{4}$ całości geometrii (457 473 elementów siatki)

DNS – obliczenia w całości geometrii (1 745 830 elementów siatki)

Symulacja numeryczna – Direct Numerical Simulation (DNS)

Energia kinetyczna turbulencji tke_{xz}



$$tke_{xz} = \langle V_x'^2 \rangle + \langle V_z'^2 \rangle$$

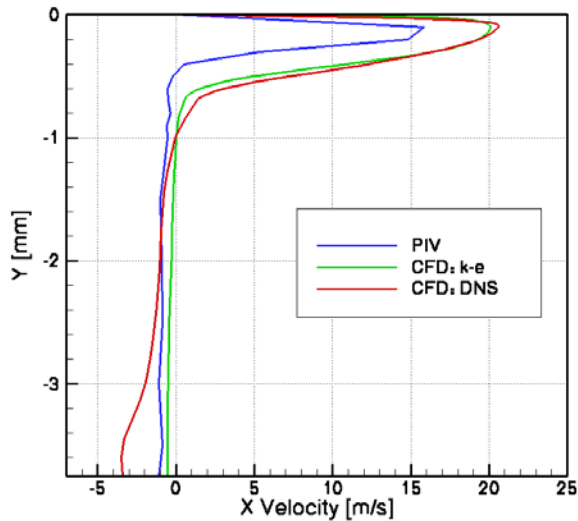
DNS – przepływ niestacjonarny

Wydatek: $Q = 0.204 \text{ dm}^3/\text{s}$

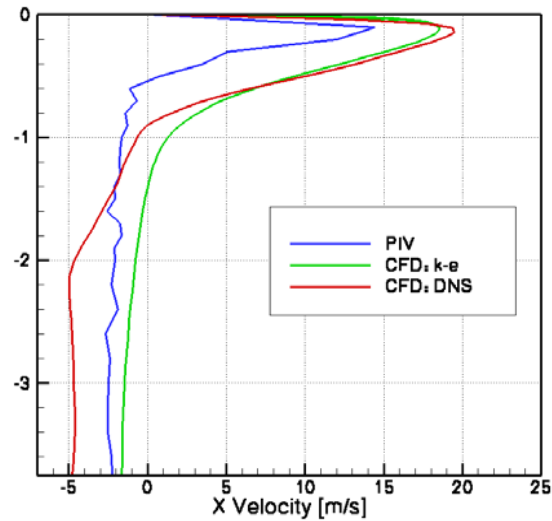
krok czasowy: $\Delta t = 1 \cdot 10^{-7} \text{ s}$

Symulacja numeryczna vs. eksperyment

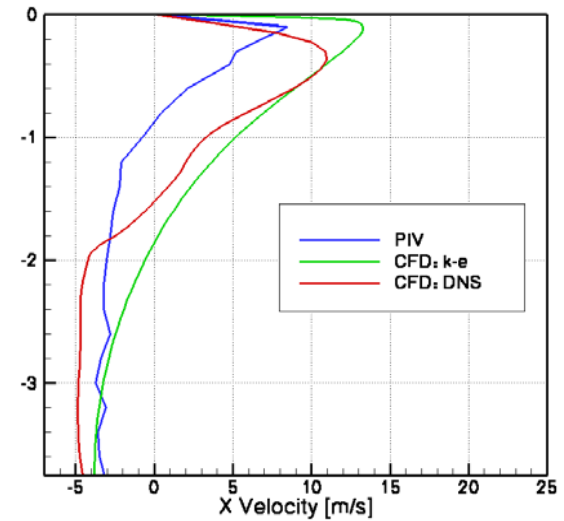
Porównanie profili prędkości V_x wyznaczonych eksperymentalnie (PIV) i numerycznie (CFD)



1mm (P3)



3mm (P4)



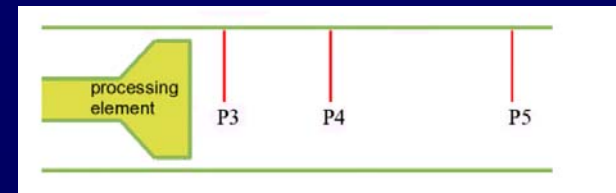
8mm (P5)

za wylotem szczeliny

CFD: model k-ε

DNS

$Q = 0.204 \text{ dm}^3/\text{s}$

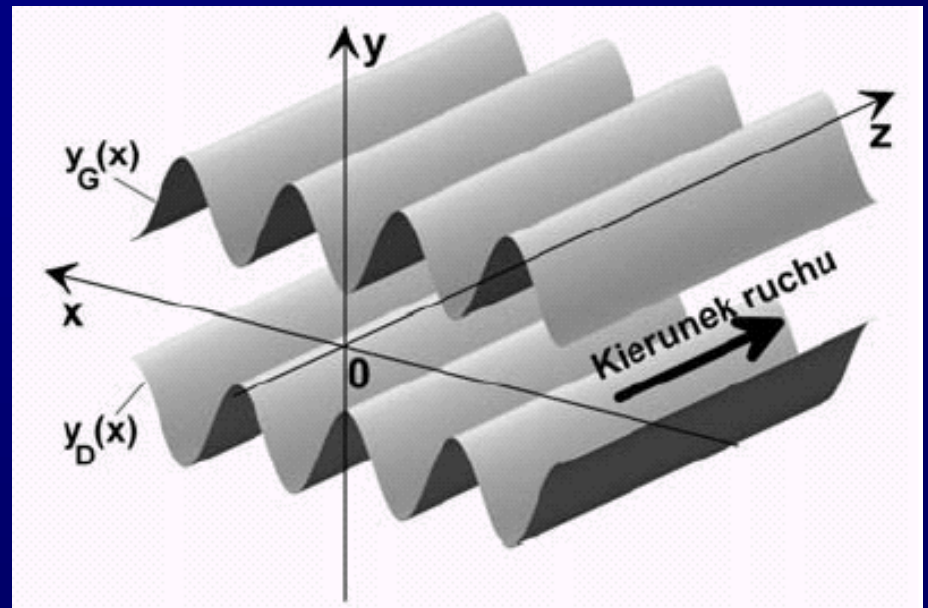


Proponowana geometria

Odpowiednie zmodyfikowanie geometrii ścianek może wymusić chaotyczną konwekcję w przepływie między dwiema ściankami i zwiększyć intensywność transportu ciepła i masy już przy bardzo niskiej liczbie Reynoldsa

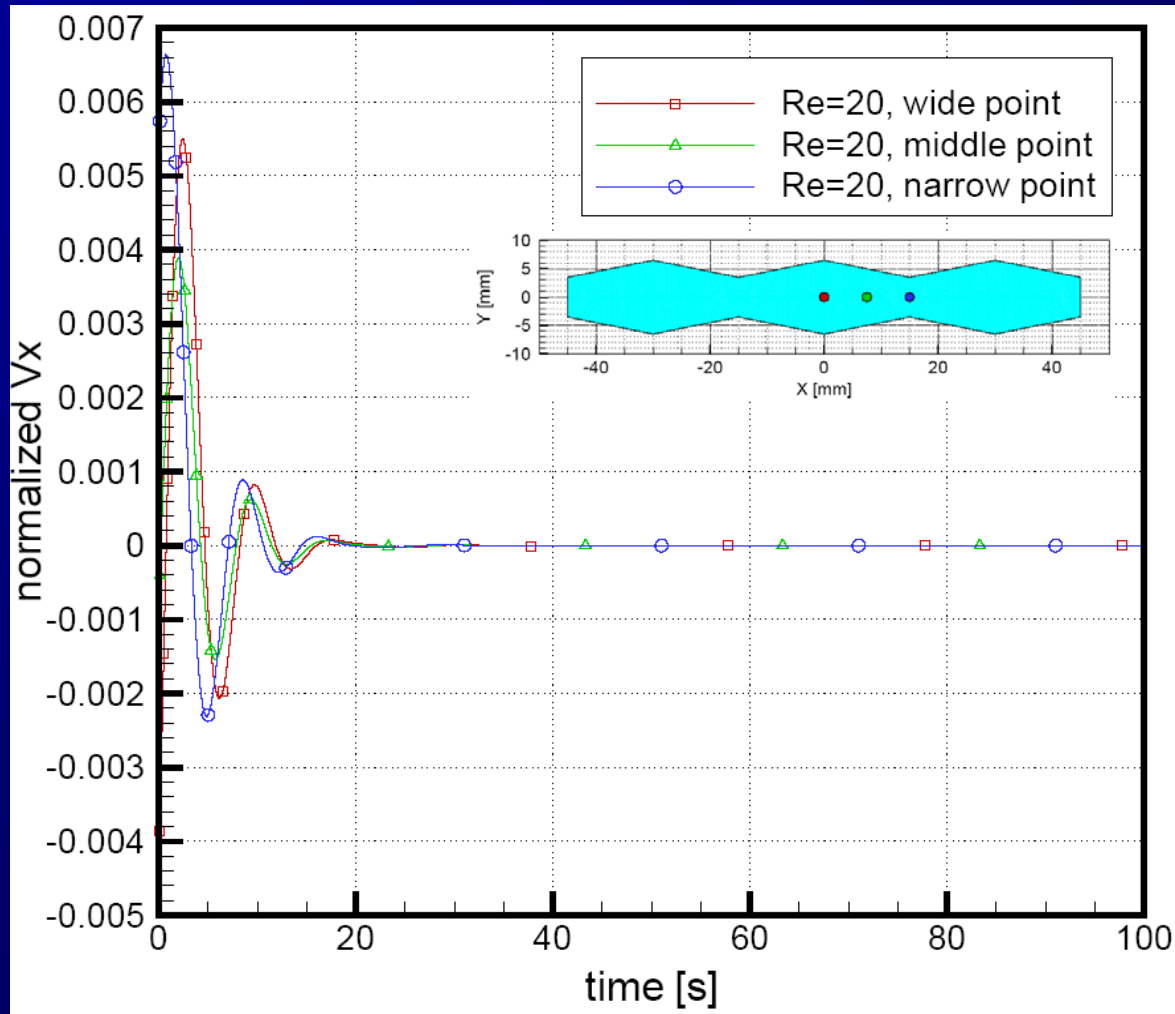
Metody analizy:

- analiza stateczności
- analiza numeryczna (DNS)



SYMULACJA NUMERYCZNA - WYNIKI

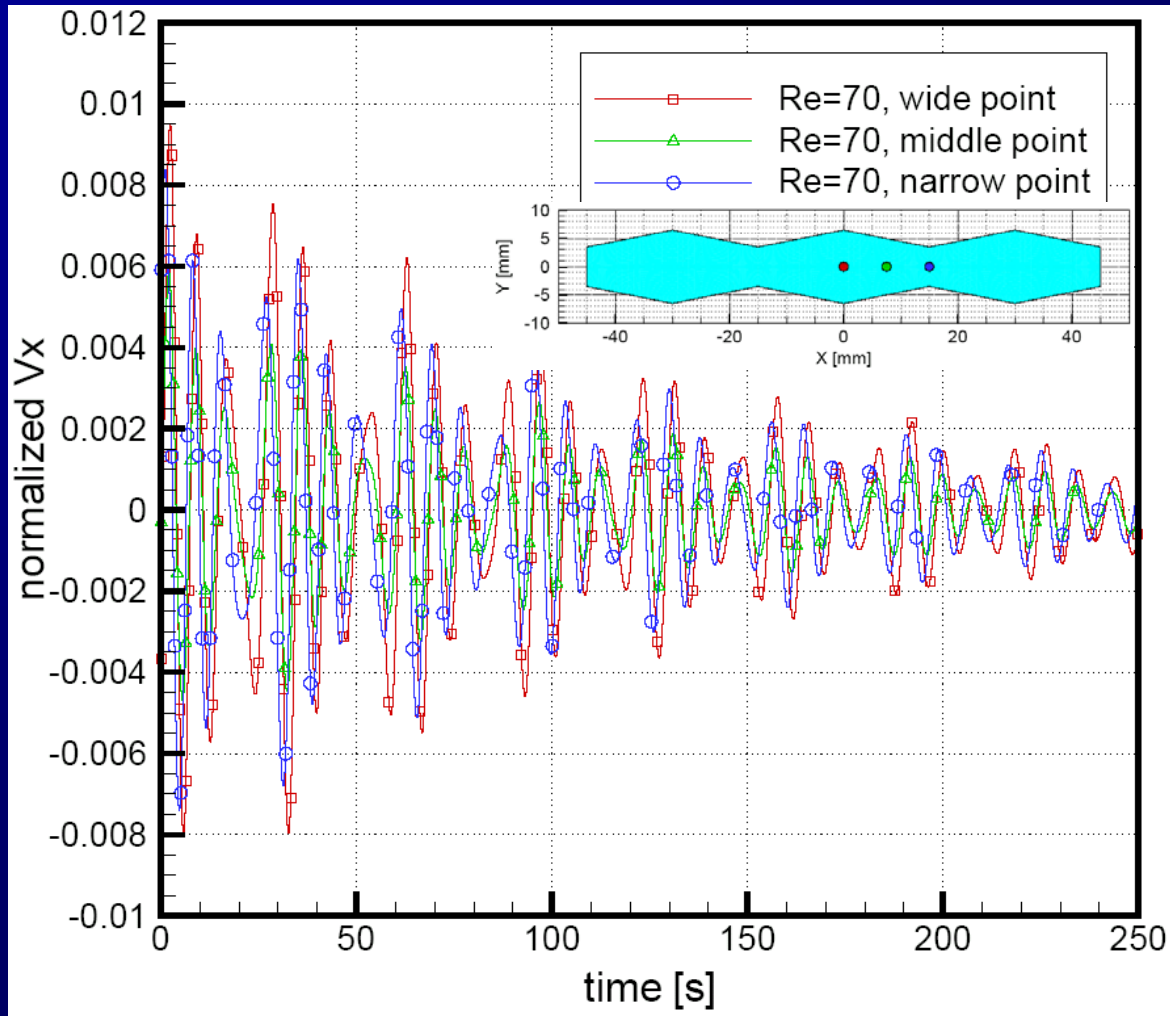
Wygaszanie początkowych zaburzeń, $Re = 20$



Znormalizowana prędkość V_x

SYMULACJA NUMERYCZNA - WYNIKI

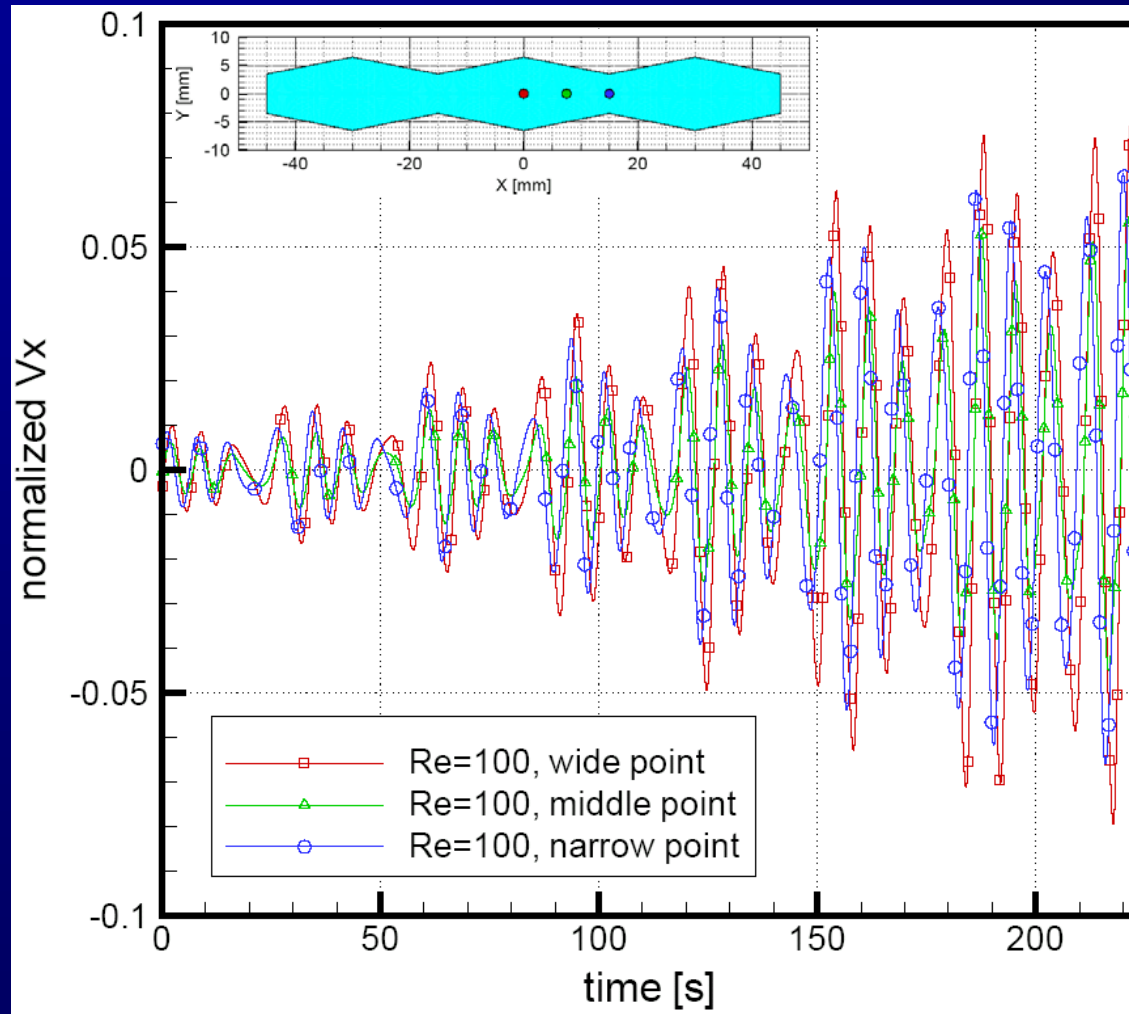
Wygaszanie początkowych zaburzeń, $Re = 70$



Znormalizowana prędkość V_x

SYMULACJA NUMERYCZNA - WYNIKI

Wzmacnianie początkowych zaburzeń, $Re = 100$



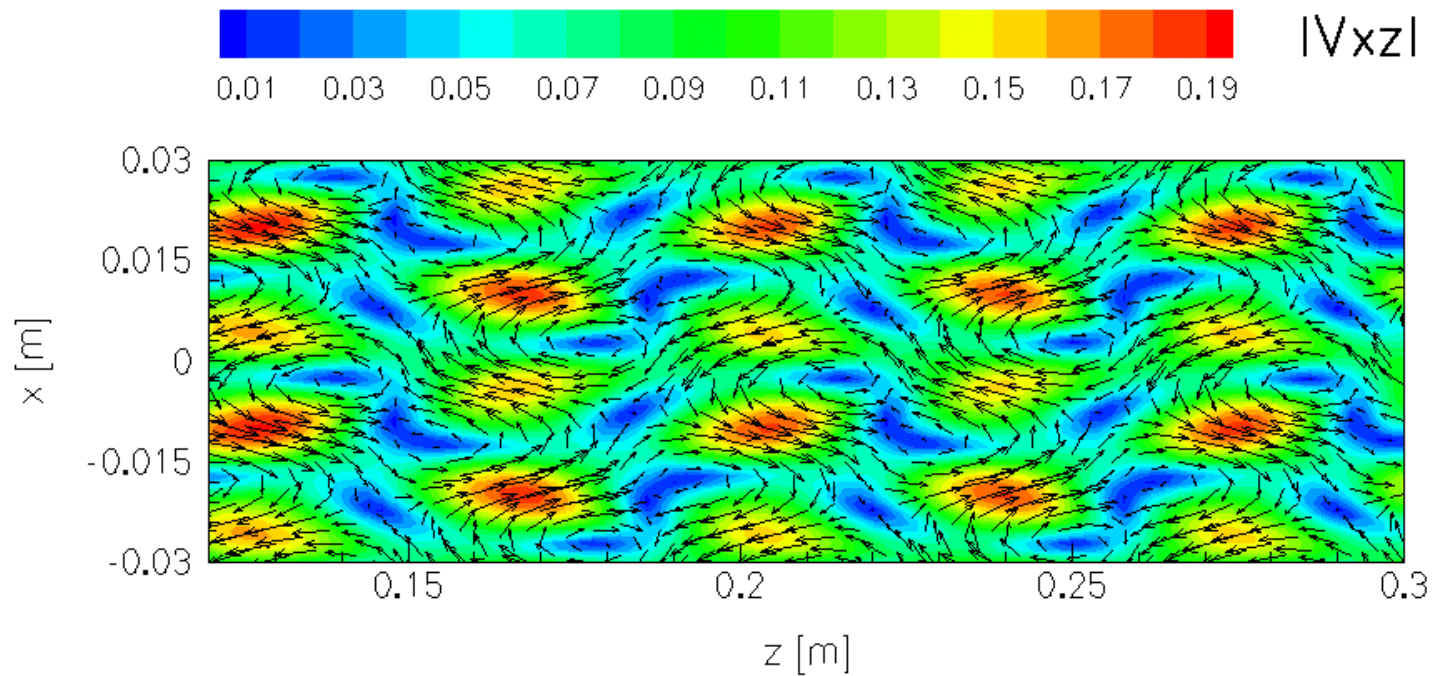
Znormalizowana prędkość V_x

SYMULACJA NUMERYCZNA - WYNIKI

Re = 100

Contours of normalized V_{xz} velocity

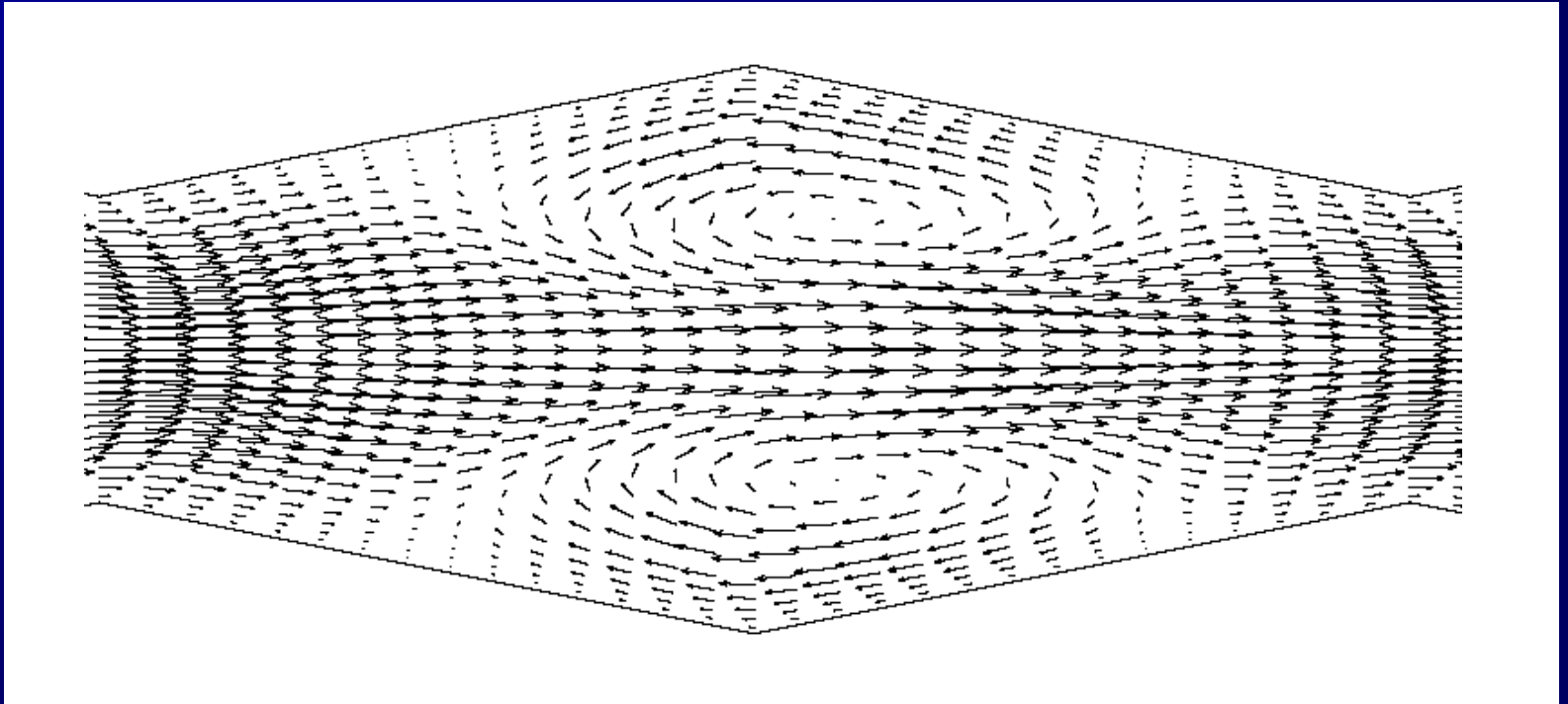
Re=100



Pole zaburzeń na płaszczyźnie symetrii ($y = 0$)

SYMULACJA NUMERYCZNA - WYNIKI

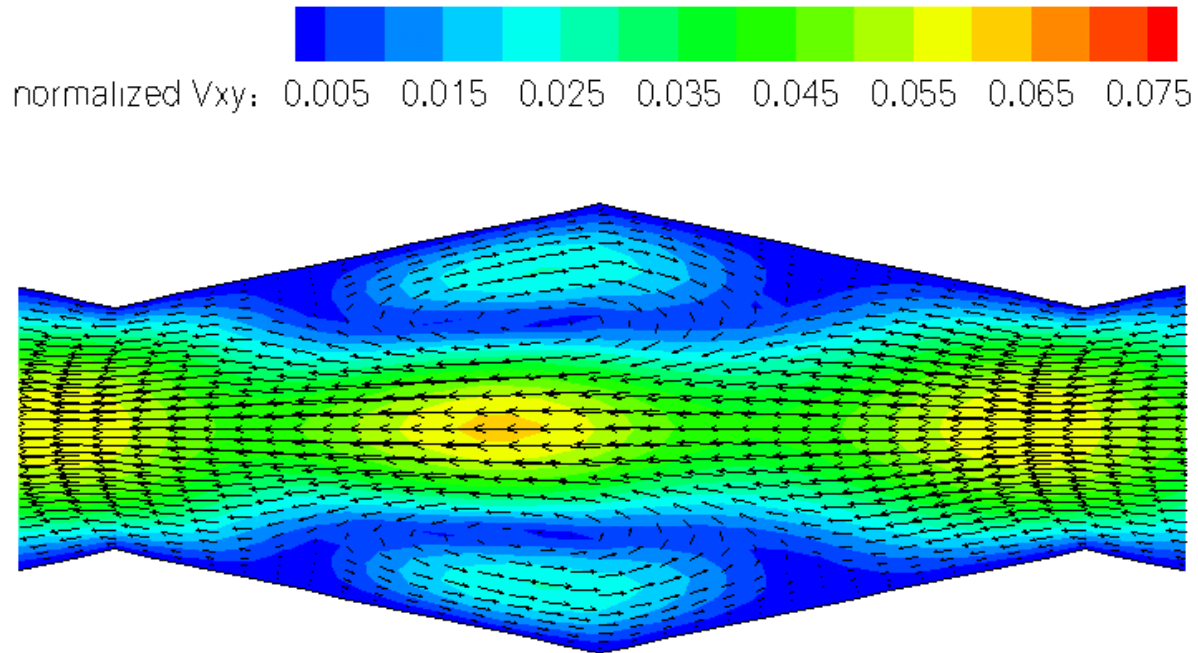
Re = 100



Pole zaburzeń na przekroju poprzecznym (płaszczyzna $z = 0$)

SYMULACJA NUMERYCZNA - WYNIKI

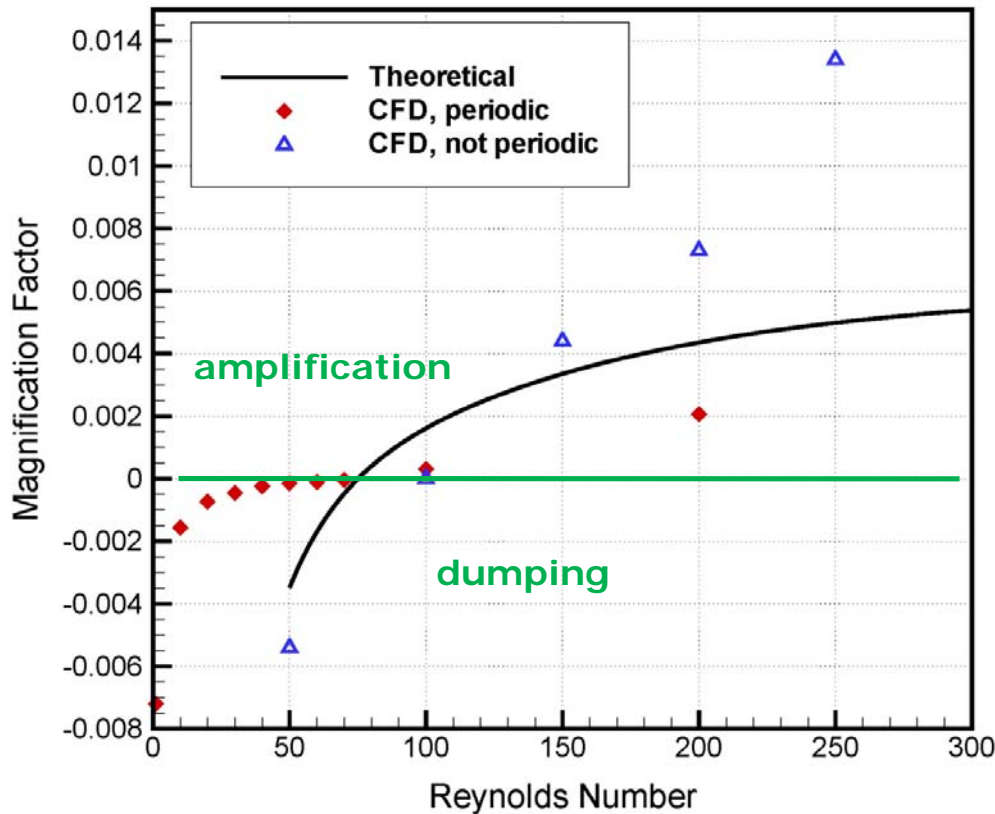
Re = 100



Pole zaburzeń na przekroju poprzecznym (płaszczyzna $z = 0$)

ANALIZA NUMERYCZNA I TEORETYCZNA - WYNIKI

Współczynnik wzmocnienia początkowych zaburzeń
(w arbitralnie przyjętych jednostkach)



solid line → linear stability analysis

diamonds → CFD, infinite channel

triangles → CFD, channel confined by side walls

Krytyczna liczba Reynoldsa: $Re_{cr} \approx 80$

Wnioski

- najnowsze badania wskazują brak wyraźnych różnic pomiędzy strukturą przepływu w skali mikro i makro
- duża chropowatość względna ($>10\%$) powoduje wzrost oporów przepływu przez mikrokanal i spadek krytycznej liczby Reynoldsa
- odejście od przekroju kwadratowego mikrokanalu (1:1) powoduje przesunięcie granicy przejścia L-T w kierunku wyższych Re i rozszerzenie przedziału intermitentnego
- wysoka liczba Reynoldsa (6770) w krótkim 1mm mikrokanale nie zapewnia turbulizacji przepływu - nie zaobserwowano znaczących fluktuacji prędkości
- przejście laminarno – turbulentne zachodzi kilka milimetrów za wylotem z mikro-szczeliny

Wnioski

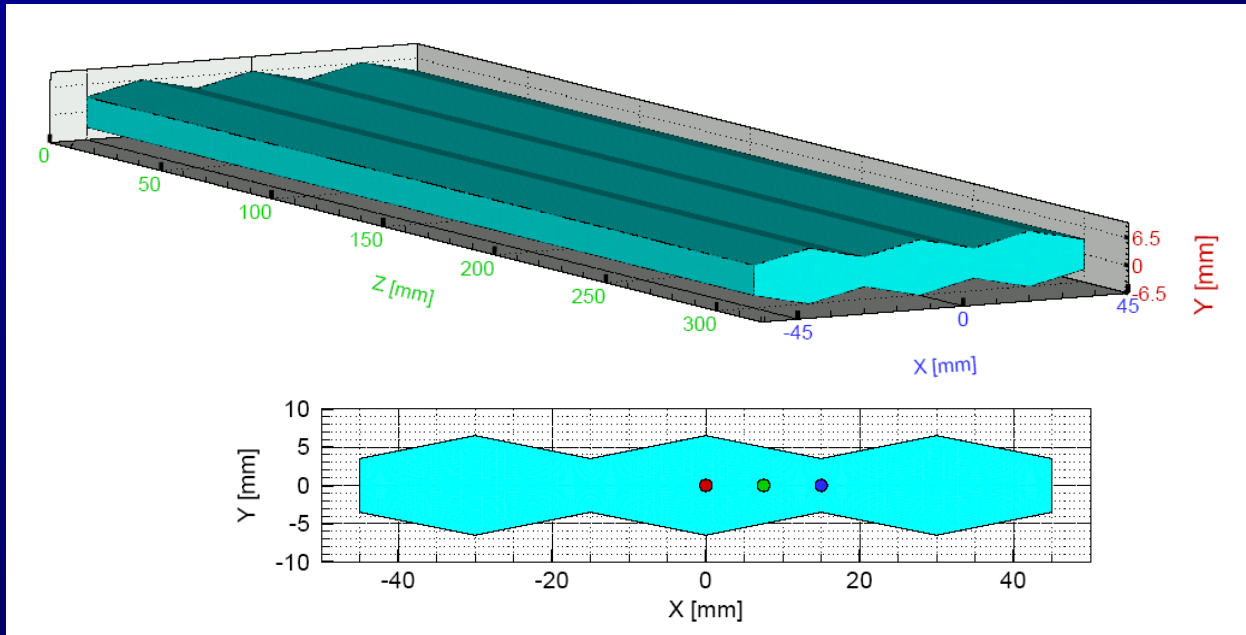
- istnienie przejścia L-T potwierdza strefa silnej recyrkulacji przepływu występują kilka milimetrów za wylotem z mikro-szczeliny
- wyniki symulacji DNS potwierdziły brak fluktuacji w szczelinie – przepływ jest tutaj quasi-laminarny
- wyniki symulacji numerycznych pokrywają się z danymi eksperymentalnymi
- odpowiednie poprzeczne pofalowanie ścianek kanału może w znacznym stopniu destabilizować przepływ
- możliwa jest chaotyczna konwekcja w przepływach laminarnych o niskiej liczbie Reynoldsa (ok. 60)
- dzięki specyficznemu pofalowaniu ścianek kanału możliwa jest intensyfikacja procesu mieszania, wymiany ciepła i masy

Dziękuję
za uwagę

SYMULACJA NUMERYCZNA

Geometria kanału i siatka obliczeniowa

$$s = 0.3; \alpha = \pi/3 \approx 1.047$$



Siatka: strukturalna, 405000 elementów (błąd rozwiązania < 0.35%)

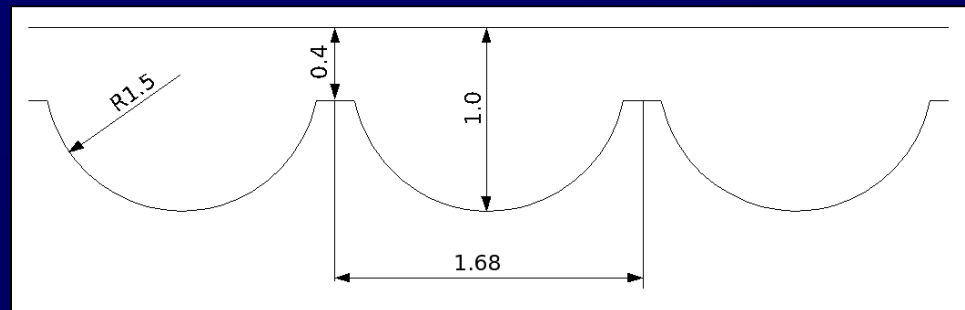
Badania stabilności przepływu wykonano dla 13 różnych wartości Re:
1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 100, 200, 500, 1000, 3000

ANALIZA EKSPERYMENTALNA

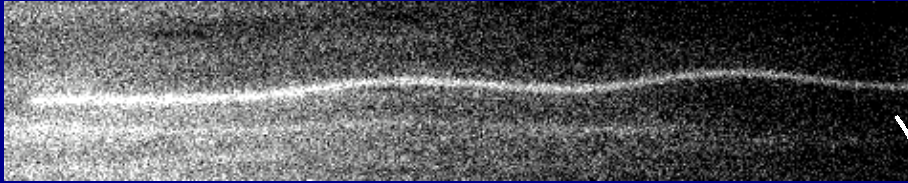


Model eksperymentalny:

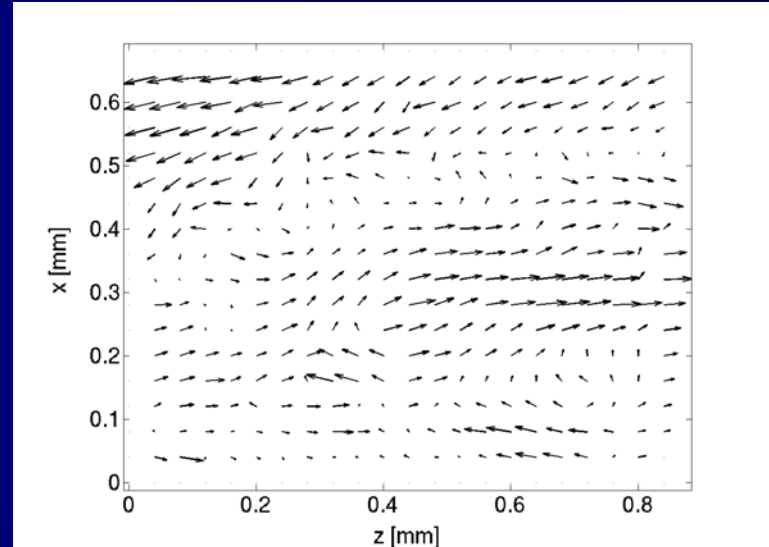
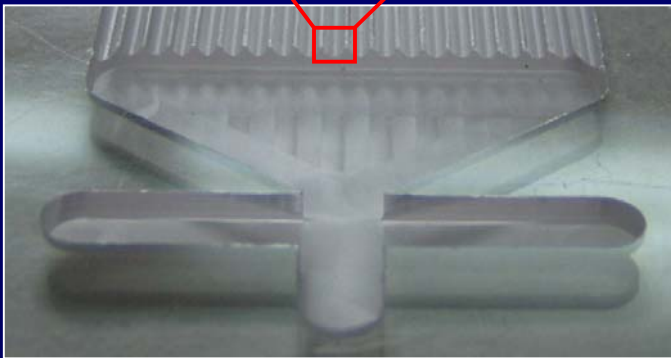
- wykonany z poliwęglanu
- dolna powierzchnia: 20 rowków
- średnia wysokość kanału: $793\mu\text{m}$
- szerokość: 33.6mm
- długość: 75mm



ANALIZA EKSPERYMENTALNA - WYNIKI



Trajektoria cząstki fluorescencyjnej
szerokość obrazu: 0.3mm
migawka 0.12s , liczba Reynoldsa
 $Re=120$



Zmierzone pole zaburzeń 0.2mm
pod górną ścianką kanału.

Szerokość zdjęcia = 0.85mm ,
liczba Reynoldsa $Re = 150$.