

# Charakterystyka hydrauliczna instalacyjnego przewodu polipropylenowego z wielokrotnymi połączeniami mufowymi

## Hydraulic characteristics of installation polypropylene pipe with numerous socket fittings

Dorota Mazur, Marcin K. Widomski, Anna Musz-Pomorska<sup>\*)</sup>

**Słowa kluczowe:** opory miejscowe, współczynniki strat miejscowych, połączenia mufowe, przewody PP-R

### Streszczenie

Niniejsza praca zawiera wyniki badań laboratoryjnych oraz modelowych oporów przepływu przez polipropylenowy przewód instalacyjny, z zamontowanymi wieloma połączeniami równoprzelotowymi. Badaniom podano prostoliniowy przewód PP-R 20 × 3,4 mm PN o długości 6 m, połączony za pomocą 2, 3, 5, 9 i 17 zgrzewanych muf PP. Badania laboratoryjne wykonano przy zmiennym natężeniu przepływu 300–1600 dm<sup>3</sup>/h, natomiast obliczenia symulacyjne przeprowadzono za pomocą komercyjnego oprogramowania FLUENT, ANSYS Inc. Uzyskane wyniki pomiarów laboratoryjnych obejmowały wysokość strat miejscowych, wartości współczynników oporów miejscowych oraz oporność hydrauliczną badanych przewodów. Obliczenia numeryczne pozwoliły na analizę rozkładu prędkości przepływu oraz intensywności turbulencji, podczas przepływu przez badane opory. Rezultaty badań sugerują wyraźny wzrost oporów przepływu oraz zmianę zależnej od liczby Reynoldsa wartości współczynników oporu miejscowego, powodowanych przez wzrost liczby połączeń. Dodatkowo, wykazano, iż zaobserwowane wartości współczynników oporu są zdecydowanie wyższe niż dane wejściowe przyjmowane do projektowania, co może prowadzić do błędów projektowych i nieprawidłowego działania instalacji wewnętrznych.

**Keywords:** local losses, coefficients of minor losses, socket connections, PP-R pipes

### Abstract

This paper presents results of laboratory and numerical research concerning water flow resistance through polypropylene installation pipe containing numerous socket fittings. The straight PP-R 20 × 3,4 mm PN 20 6 meters long with 2, 3, 5, 9 and 17 welded PP socket fittings was tested. The laboratory research was performed with the variable value of volumetric water flow rate 300–1600 dm<sup>3</sup>/h while the numerical calculations were performed in the commercial modeling software FLUENT, ANSYS Inc. The obtained results of laboratory measurements covered height of local losses, values of minor losses coefficients and the hydraulic resistance of the studied pipe. The numerical calculations allowed assessment of velocity magnitude and turbulence intensity during water flow through the tested local pressure losses. The obtained results suggest the clear increase in flow resistance and changes in Reynolds number dependable value of minor losses coefficient caused by the increase in number of applied socket fittings. Additionally, it was determined that the obtained values of minor losses coefficients are higher than the commonly proposed input data for domestic installations designing, which may result in the design errors and incorrect operation of the system.

## 1. Wstęp

W przypadku przewodów długich, strat miejscowe są znacznie mniejsze od strat liniowych, więc przy obliczeniach są pomijane, bądź uwzględniane jako procent od strat liniowych. W instalacjach natomiast, opory miejscowe mają znaczący wpływ na wysokość strat. Zgodnie z powszechnie stosowaną metodyką obliczeniową, podaną w wycofanej już normie PN-B-01706:1992 [18], przy wyznaczaniu minimalnego ciśnienia dla instalacji, strat miejscowe określa się w sposób przybliżony, jako 20–25% sumy strat na długości. O ile powyższe przybliżenie można było uznać za wystarczające w dobie materiałów z wysokim współczynnikiem chropowatości, przy obliczeniach instalacji z tworzyw polimerowych,

charakteryzujących się niskimi wartościami współczynnika chropowatości, może prowadzić to do błędów przy projektowaniu [1, 3, 5, 24–26, 30]. Badania prowadzone przez Nowakowskiego (1995) [15] wykazały, iż straty miejscowe w instalacji stanowią mogą nawet od 50% (w budynku jednorodinnym) do 146% (w budynku wielorodzinnym) sumy strat na długości.

Znajomość współczynników strat jest więc konieczna do prawidłowego zaprojektowania instalacji [16]. Obecnie nie są dostępne aktualne normy, które określałyby sposób wyznaczania strat w przypadku połączeń wielokrotnych. Dla pojedynczych kształtek, dostępna jest norma PN-M-34034:1976 [18]. Nie uwzględnia ona jednak połączeń przewodów polimerowych. Opory miejscowe, wynikające z połączeń rurociągów poprzez złączki, dostępne są w katalogach

<sup>\*)</sup> Dorota Mazur, mgr inż. – Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków, Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, dorotamazur93@gmail.com,

Marcin K. Widomski, dr hab. inż. – Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków, Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, m.widomski@pollub.pl

Anna Musz-Pomorska, dr inż. – Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków, Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, a.musz-pomorska@pollub.pl

producentów, aczkolwiek różnią się między sobą oraz często nie określają strat zależnej od średnicy rury. Dodatkowo, wielokrotnie wykazano, iż normatywne, czy też zalecane przez poradniki projektowania, wartości współczynników oporów miejscowych połączeń oraz różnej armatury są zdecydowanie niższe niż wartości współczynników dla tych samych oporów zamontowanych w układach rzeczywistych, za pomocą połączeń charakterystycznych dla danego rodzaju materiału przewodu [3, 4, 9, 10, 17, 22, 28, 30].

W przypadku połączeń zgrzewanych, nieumiejętne wykonanie zgrzewu znacznie zmniejsza prześwit rury, a co za tym idzie, zwiększają się opory miejscowe, szczególnie w przypadku małych wartości średnic [7]. Wysokość oporów miejscowych zależy także od szorstkości ścianki wewnętrznej oraz średnicy rury [7].

W niniejszej pracy pomierzono laboratoryjnie straty ciśnienia na wielokrotnych połączeniach mufowych zgrzewanych instalacyjnego rurociągu polipropylenowego oraz wyznaczono charakterystykę hydrauliczną przewodu. Dodatkowo w celu zaobserwowania zmian rozkładu intensywności turbulencji oraz przeanalizowania wpływu ilości oraz odległości połączeń na wysokość współczynnika oporu lokalnego, przeprowadzono symulację CFD przepływu wody przez układ pomiarowy w programie ANSYS Fluent 19.1. Następnie wykonano walidację modelu oraz przeprowadzono analizę statystyczną otrzymanych wyników. Wysokości oporów miejscowych, otrzymanych poprzez wykonanie eksperymentu, zostały porównane z literaturowymi wartościami oporów miejscowych dla badanego połączenia.

## 2. Metodyka pomiarów

Badania mające na celu określenie wartości start ciśnienia oraz charakterystyki hydraulicznej przewodu instalacyjnego z polipropylenu PP-R, z wielokrotnymi połączeniami mufowymi obejmowały część laboratoryjną oraz modelową.

Badania wykonano na trzech rurach o długości 2 m, wykonanych z PP-R zgodnie z PN-EN ISO 15874-2: 2013 [21], o średnicy zewnętrznej 20 mm, grubości ścianki 3,4 mm, i ciśnieniu PN 20, połączonych odpowiednio 2, 3, 5, 9 lub 17 zgrzewanymi mufami PP.

### Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne umożliwiające określenie strat ciśnienia na przewodach PP-R z wieloma połączeniami mufowymi, przeprowadzono na specjalnie do tego celu wykonanym stanowisku badawczym (rys. 1).

Stanowisko składało się z części pomiarowej, obejmującej zestaw połączonych ze sobą rotametrów oraz wymiennej części badawczej, złożonej z badanych przewodów polipropylenowych PP-R połączonych za pomocą zgrzewanych muf PP. Woda wodociągowa do zasilania stanowiska, o monitorowanej temperaturze, była pobierana poprzez zbiornik wyrównawczy z wewnętrznej instalacji wodociągowej budynku. Zestaw rotametrów wykorzystanych do pomiaru natężenia przepływu składał się z czterech rotametrów klasy 4 o zakresach pomiarowych 20–200 dm<sup>3</sup>/h, 60–600 dm<sup>3</sup>/h, 100–1000 dm<sup>3</sup>/h i 60–600 dm<sup>3</sup>/h produkcji Meister Strömungstechnik, Weissen, Niemcy. Użyte w badaniach rotometry zostały poddane cechowaniu za pomocą metody naczynia podstawionego. Różnice ciśnień dla wybranych przekrojów przed i za badanymi połączeniami mierzono za pomocą elektronicznego manometru różnicowego Lutron Electronic (zakres pomiarowy: 0–20 mH<sub>2</sub>O, dokładność 2%) w odległościach, odpowiednio, 10d i 60d przed i za pierwszym i ostatnim oporem miejscowym [4, 30], zgodnie z wymaganiami PN-EN 1267:2012 [20]. Badania przeprowadzono dla jedenastu różnych wielkości wartości objętościowego natężenia przepływu. W celu zminimalizowania błędów pomiarowych każdy pomiar powtórzono trzykrotnie.

Wartość współczynnika oporów liniowych dla każdego z pomiarów wyznaczono za pomocą metody kolejnych przybliżeń, w oparciu o równanie Colebrooka-White'a, dla chropowatości ( $k$ ) przewodu z PP-R równej 0,007 mm:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left( \frac{k \cdot d^{-1}}{3,71} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \right) \quad (1)$$

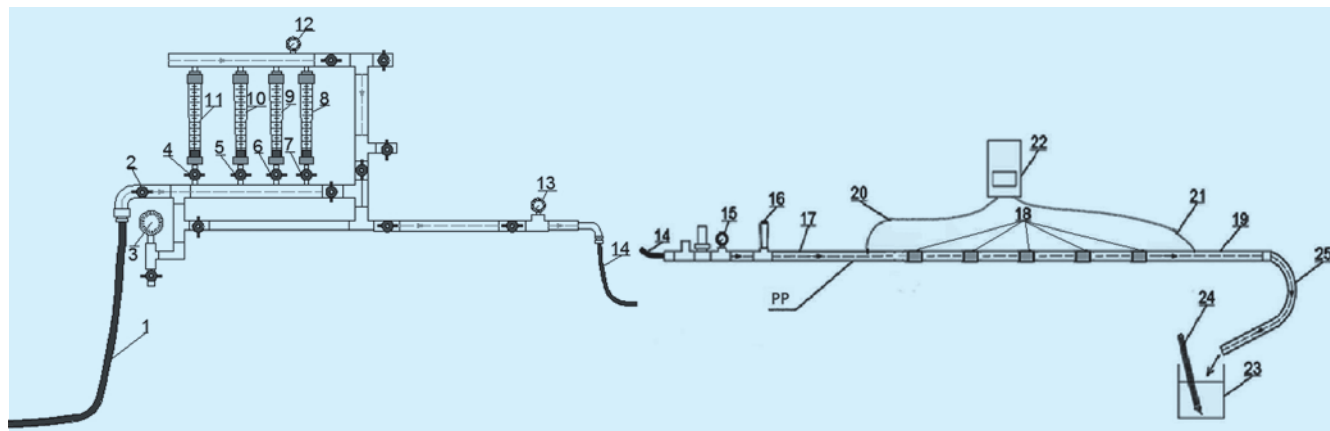
gdzie:  $\lambda$  – współczynnik oporów liniowych [–];  $k$  – chropowatość względna przewodu [m];  $Re$  – liczba Reynoldsa [–].

Wysokość linowej straty ciśnienia dla badanego odcinka przewodu wyznaczono ze wzoru:

$$\Delta h_l = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

Wysokość miejscowej straty ciśnienia wyznaczono ze wzoru:

$$\Delta h_m = \Delta h_{\text{manometr}} - \Delta h_l \quad (3)$$



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego, 1 – przewód zasilający stanowisko, 2, 4, 5, 6, 7 – zawory odcinające, 3, 12, 13, 15 – manometry, 8, 9, 10, 11 – rotometry, 14 – przewód elastyczny, 16 – zawór odpowietrzający, 17, 19 – przewód PP-R o DN 20, 18 – mufy PP, w zależności od przypadku 2, 3, 5, 9 lub 17 szt., 20, 21 – wężyki impulsowe, 22 – elektroniczny manometr różnicowy, 23 – zlewka, 24 – termometr, 25 – odpływowy przewód elastyczny

Fig. 1. Scheme of laboratory installation, 1 – inflow pipe, 2, 4, 5, 6, 7 – valve, 3, 12, 13, 15 – manometers, 8, 9, 10, 11 – rotameters, 14 – elastic pipe, 16 – air removal valve, 17, 19 – PP-R pipe, DN20, 18 – socket connection, respectively 2, 3, 5, 9 or 17 pcs, 20, 21 – impulse pipe, 22 – electronic differential manometer, 23 – glass, 24 – thermometer, 25 – elastic outflow pipe

Sumę współczynników oporu miejscowego dla wielokrotnych połączeń przewodu polipropylenowego  $\Sigma\zeta$  wyznaczono według wzoru:

$$\Sigma\zeta = \frac{2 \cdot \Delta h_m}{v^2} \quad (4)$$

gdzie:  $\lambda$  – współczynnik oporów liniowych [-];  $l$  – długość przewodu pomiędzy podłączeniem miernika różnicy ciśnienia [m];  $d$  – wewnętrzna średnica przewodu [m] ( $d=0,0132$  m);  $v$  – prędkość przepływu cieczy [m/s];  $g$  – przyspieszenie ziemskie [ $m/s^2$ ], ( $g=9,81$   $m/s^2$ );  $\Delta h_{manometr}$  – straty ciśnienia odczytane z miernika różnicy ciśnienia [ $mH_2O$ ];  $\Delta h_l$  – liniowe straty ciśnienia [ $mH_2O$ ];  $\zeta$  – współczynnik strat miejscowych [-].

Intensywność turbulencji wyznaczono ze wzoru:

$$I = 0,16 Re^{-\frac{1}{8}} \quad (5)$$

gdzie:  $I$  – intensywność turbulencji [-].

Oporność hydrauliczną obliczono ze wzoru:

$$R = \frac{\Delta h}{Q^2} \quad (6)$$

gdzie:  $R$  – oporność hydrauliczna [ $s^2/m^5$ ];  $\Delta h_m$  – straty miejscowe [m];  $Q$  – natężenie przepływu [ $m^3/s$ ].

Zasięg oddziaływania badanego oporu wyznaczono ze wzoru:

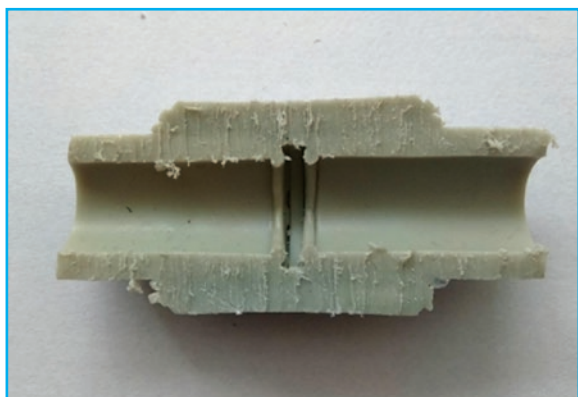
$$l_o = 0,5 \frac{\zeta}{\lambda} d \quad (7)$$

gdzie:  $l_o$  – zasięg oddziaływania oporu miejscowego [m].

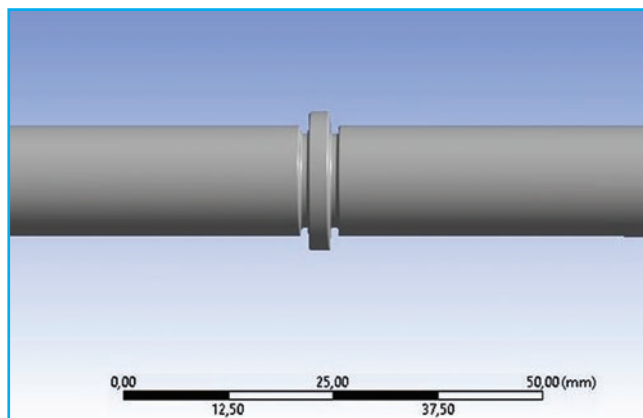
## Badania modelowe

Badania numeryczne przepływu cieczy rzeczywistej (wody) przez przewód z połączeniami mufowymi przeprowadzono w programie symulacyjnym opartym o metodę elementów skończonych FLUENT, Ansys Inc., USA [2, 12, 23, 29]. Opracowano pięć modeli przepływu kolejno dla 2, 3, 5, 9 oraz 17 połączeń mufowych. Odzworowano rzeczywistą geometrię płynu dla każdego przypadku oddzielnie. Połączenie mufowe (rys 3.) odzworowano na podstawie mufy przedstawionej na rys 2.

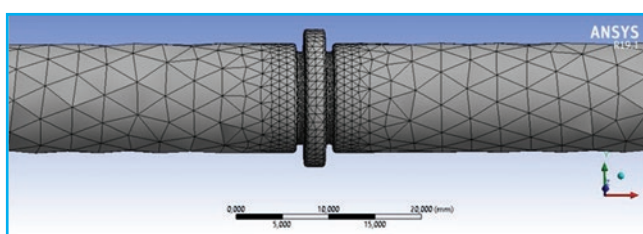
Opracowana siatka elementów skończonych, dodatkowo zagęszczona w miejscu występowania połączenia, zawierała od 321943 (w przypadku połączeń pięciu muf) do 391923 (dla dzie-



Rys. 2. Przekrój poprzeczny badanej mufy  
Fig. 2. Cross-section of the tested socket



Rys. 3. Model geometryczny przewodu z połączeniem mufowym  
Fig. 3. Geometric model of a pipe with a socket connection



Rys. 4. Siatka płynu dla przewodu i połączenia mufowego  
Fig. 4. Fluid mesh for pipe and socket connection

więciu połączeń) elementów skończonych oraz od 77384 (5 połączeń) do 92376 (9 połączeń) węzłów (rys. 4).

Obliczenia numeryczne przepływu wody jako cieczy rzeczywistej przez badany zawór kulowy oparto o dwurównaniowy model turbulencji k-epsilon [8].

Obliczenia symulacyjne przeprowadzono w oparciu o wyniki badań laboratoryjnych dla natężenia przepływu wody od 400  $dm^3/h$  do 1560  $dm^3/h$ , (co odpowiadało liczbie Reynoldsa od 7185 do 42045).

Dane wejściowe do obliczeń modelowych obejmowały gęstość wody w zakresie 998,3–998,9  $kg/m^3$  oraz lepkość w zakresie 0,001–0,0011  $kg/(m \cdot s)$  (zależne od temperatury zaobserwowanej w czasie pomiarów laboratoryjnych).

Przyjęte do obliczeń symulacyjnych warunki brzegowe obejmujące masowe natężenie przepływu na wlocie do przewodu, nadciśnienie statyczne, intensywność turbulencji, chropowatość przewodu oraz ciśnienie na wylocie z układu przyjęte do obliczeń, przedstawiono w tab. 1.

## Walidacja modelu

W celu określenia zgodności wyników badań laboratoryjnych i numerycznych, przeprowadzono ich walidację. Wyznaczono współczynnik korelacji liniowej Pearsona –  $R$ , współczynnik determinacji –  $R^2$ , błąd średniokwadratowy – MSE pierwiastek błęd średniokwadratowego – RMSE, współczynnik efektywności modelu Nasha–Sutcliffe’a – NSE oraz stosunek błęd średniokwadratowych wyników modelowych (RMSE) do odchylenia standardowego – RSR [13]. W celu wyznaczenia normalności rozkładów, przeprowadzono test istotności Shapiro–Wilka. Jako próg istotności przyjęto  $p = 0,05$ . W przypadku mniejszej od 5% wartości, odrzucono hipotezę zerową. Ponieważ nie wszystkie rozkłady miały charakter rozkładu normalnego, przeprowadzono nieparametryczny test ANOVA Kruskala Wallisa, wraz z testem post-hoc, w celu sprawdzenia, czy liczba zastosowanych na przewodzie połączeń mufowych różnicuje straty w sposób istotny statystycznie.

Tabela 1. Warunki brzegowe przyjęte do obliczeń numerycznych  
 Table 1. Boundary conditions adopted for numerical calculations

	Rodzaj warunku	Wartość	Uwagi
Warunki brzegowe na wejściu do układu	Masowe natężenie przepływu	Zmienne, w zakresie 0,1089 kg/s – 0,4716 kg/s	
	Nadciśnienie statyczne	300 000 Pa	
	Intensywność turbulencji	Zmienna, zależna od masowego natężenia przepływu, 4,216–5,062%	Rozumiana jako [11]: $I = \frac{\sqrt{u}}{U}$ Gdzie $u$ – fluktuacja prędkości przepływu, $U$ – prędkość średnia w przekroju poprzecznym Wartość warunku brzegowego oszacowano na podstawie [2, 11]: $I = 0,16 \cdot Re^{-\frac{1}{8}}$
Warunki brzegowe na wyjściu z układu	Ciśnienie statyczne	101325 Pa (ciśnienie atmosferyczne)	Wypływ do atmosfery
	Współczynnik przepływu	1,0	Określa stosunek strumienia natężenia przepływu na wejściu i wyjściu z układu
Warunek brzegowy na ścianie przewodu	Wysokość chropowatości	0,000007 m	Określona na podstawie informacji od producenta przewodu

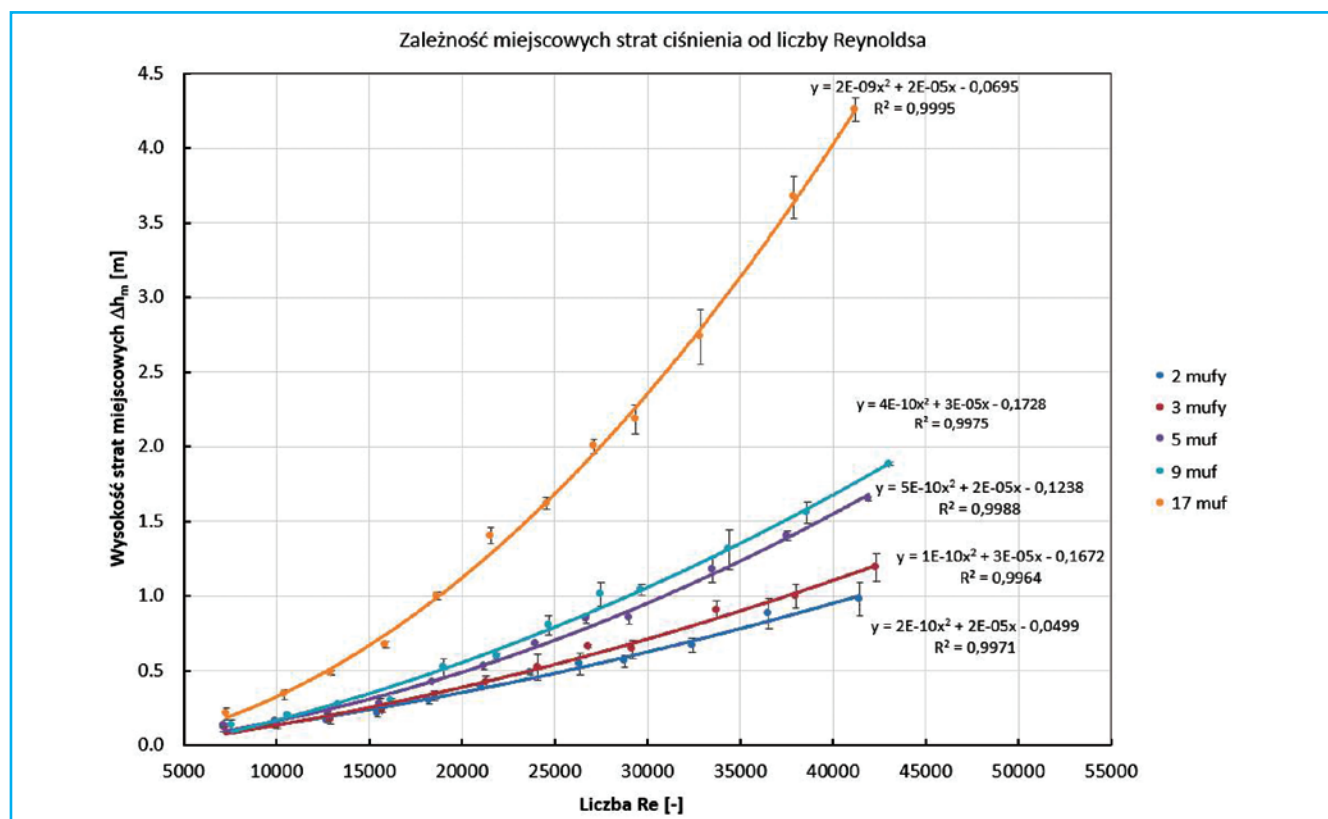
### 3. Wyniki

Wyniki badań laboratoryjnych zależności miejscowych strat ciśnienia, zależności sum współczynników oporów miejscowych oraz obliczonej oporności właściwej w funkcji liczby Reynoldsa, dla połączenia 2, 3, 5, 9 oraz 17 muf przedstawiono na rys. 5–7.

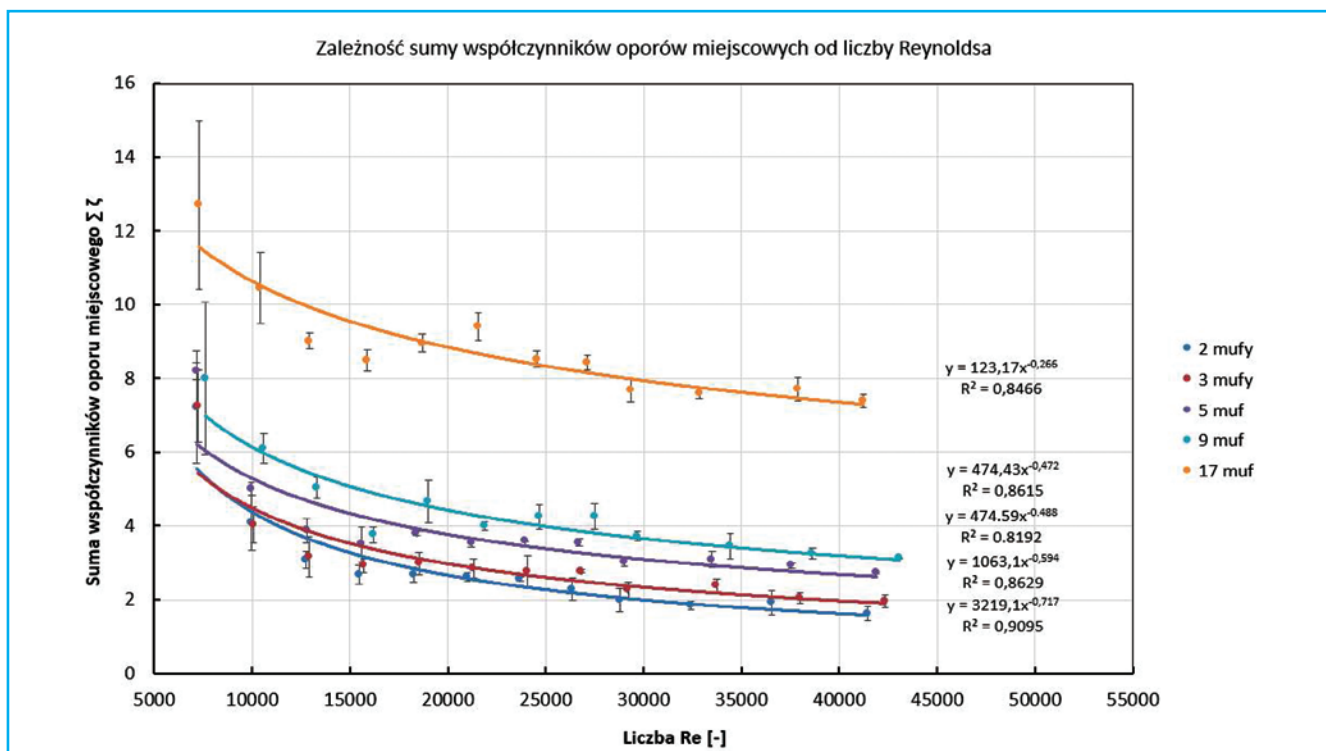
Zaobserwowano bezpośrednią zależność wysokości miejscowych strat ciśnienia od liczby Reynoldsa (rys. 5). W zakresie przepływu laminarnego ( $Re$  od 7000 do 12000) pomierzone wartości strat miejscowych mają zbliżone wartości od 0,11 m–0,48 m, odpowiednio dla 2 i 17 muf, natomiast wraz ze wzrostem liczby  $Re$ , widoczny jest zdecydowany wzrost ich wartości wraz z liczbą po-

Tabela 2. Średnia wartość oporności w zależności od liczby połączeń mufowych  
 Table 2. Average value of resistance depending on the number of socket connections

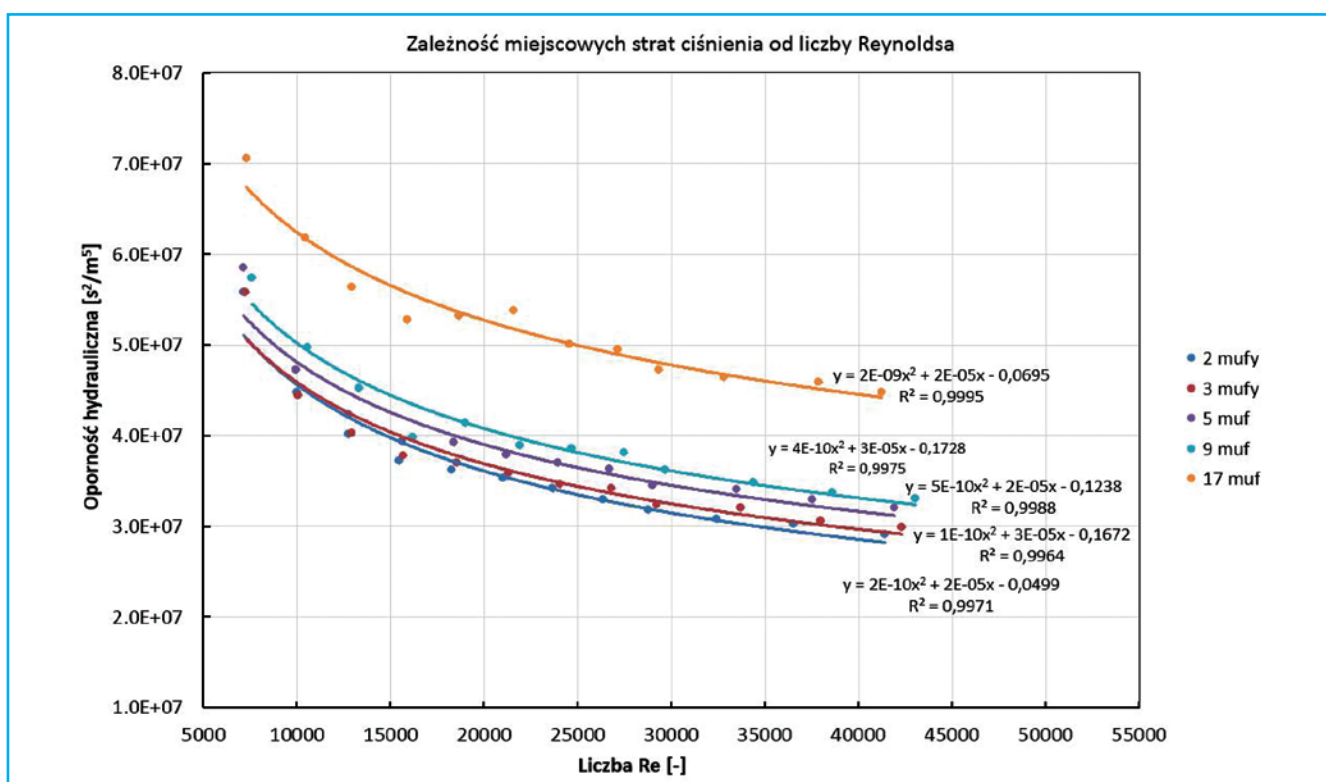
Liczba muf [szt.]	Średnia wartość $R$ [ $s^2/m^5$ ]
2	36553607
3	37092557
5	39290083
9	40585549
17	52721763



Rys. 5. Zależność miejscowych strat ciśnienia od liczby Reynoldsa  
 Fig. 5. Dependence of local pressure losses on the Reynolds number



Rys. 6. Zależność sumy współczynników oporów miejscowych od liczby Reynoldsa  
 Fig. 6. Dependence of the sum of the local resistance coefficients on the Reynolds number



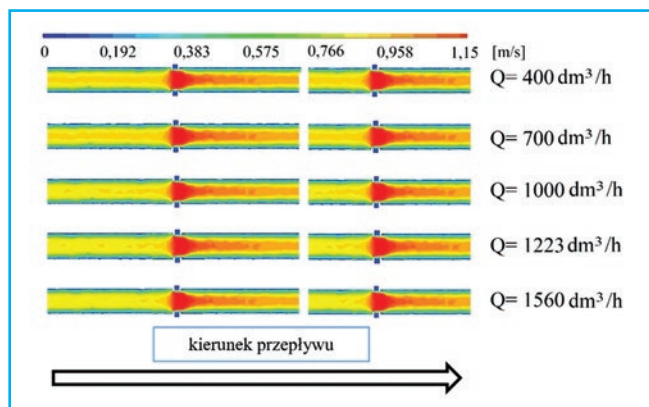
Rys. 7. Zależność oporności hydraulicznej od liczby Reynoldsa  
 Fig. 7. Dependence of hydraulic resistance on Reynolds number

łączeń (dla  $Re = 47000$  pomierzone wysokości miejscowych start ciśnienia wynosiły 0,98 i 4,25 metra, odpowiednio dla 2 i 17 muf).

Przedstawione na rys. 6 sumy współczynników oporów miejscowych od liczby  $Re$  oraz na rys. 7 oporności hydrauliczne, wskazują, iż wraz ze wzrostem wielkości przepływu, zarówno sumy współczynnika oporów jak i oporności maleją. Najmniejsze różnice zaob-

serwowano dla 2 muf (suma oporów od 7,21 do 1,62 oraz oporność od  $5,6 \cdot 10^7$  do  $2,9 \cdot 10^7$  dla  $Re$  7140 i 42045), największe dla 17. połączeń mufowych (suma oporów od 12,7 do 7,38 oraz oporność od  $7,1 \cdot 10^7$  do  $4,5 \cdot 10^7$  dla  $Re$  7140 i 42045).

Średnia wartość oporności w zależności od liczby połączeń, podana w tab. 2, wskazuje, iż najmniejsza oporność hydrauliczna



Rys. 8. Rozkład prędkości średnich dla połączenia dwóch muf

Fig. 8. Average velocity distribution for 2 sockets fittings

występuje dla przewodu z dwoma mufami, największa dla przewodu z 17. połączeniami. Zaobserwowano wzrost średniej oporności dla przewodu z 17. połączeniami w stosunku do przewodu z dwoma połączeniami o 144%.

Przeprowadzona przy pomocy testu ANOVA Kruskala-Wallisa analiza statystyczna różnic, zaobserwowanych pomiędzy wysokością strat miejscowych, wartością współczynników oporów miejscowych oraz oporności hydraulicznych, dla badanych przypadków wykazała występowanie różnic istotnych statystycznie. Wykonane testy post-hoc ujawniły występowanie istotnych statystycznie różnic pomiędzy wysokościami strat miejscowych, przy zmiennej liczbie Re dla zestawów 2-9, 2-17 oraz 3-9 i 3-17 połączeń. Analogicznie, testy post-hoc przeprowadzone dla wartości współczynników oporu miejscowego danego układu w funkcji zmiennej liczby Reynoldsa, wykazały występowanie istotnych statystycznie różnic

dla par 2-5, 2-9, 2-17, 3-9, 3-17, 5-9 oraz 5-17 połączeń. Wyniki testu post-hoc dla obliczonych oporności badanych przewodów wskazują na to, iż dystrybuanty rozkładów porównywanych grup z dwoma, trzema oraz pięcioma oraz dziewięcioma mufami nie różnią się w sposób istotny statystycznie, innymi słowy przy małych oporach różnice nie są istotne, natomiast dystrybuanty rozkładów grup połączenia siedemnastu muf z dwoma, trzema oraz pięcioma mufami różnią się istotnie statystycznie.

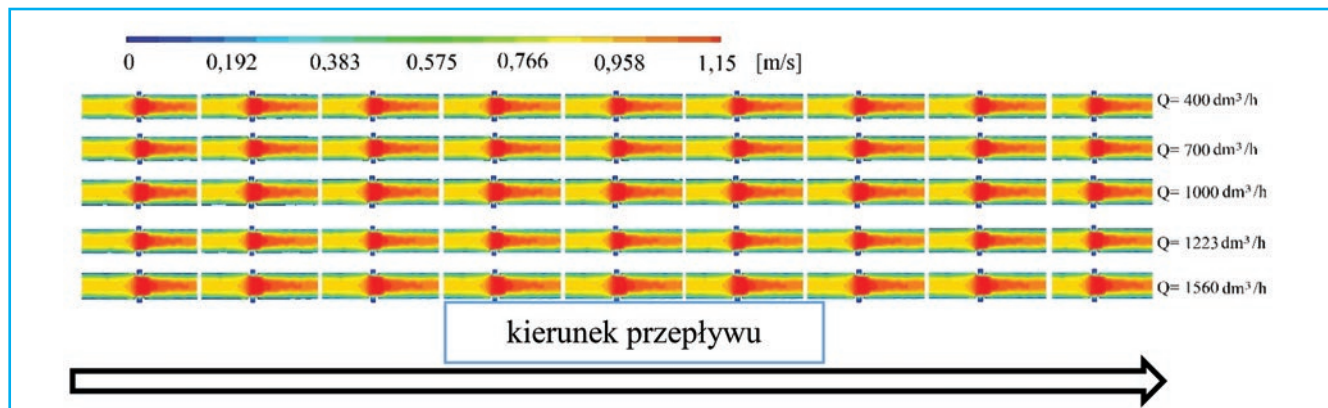
Wyniki obliczeń numerycznych obejmowały zaobserwowane wartości prędkości przepływu oraz intensywności turbulencji. Graficzną interpretację uzyskanych wyników prędkości przepływu, dla wybranej liczby połączeń (2 i 9 muf) pokazano na rys. 8–9.

Ukazane rozkłady prędkości, dla wybranych przypadków, przedstawione na rys. 8 i 9 wskazują, iż w każdym przypadku następuje wzrost prędkości średniej na połączeniach mufowych. Płyn osiąga największą prędkość w osi połączenia, a następnie tuż za nim, zgodnie z kierunkiem przepływu. Najmniejsza prędkość znajduje się w tzw. polu martwym, na obwodzie łączenia rur.

Na rys. 10 przedstawiono rozkład intensywności turbulencji dla dwóch następujących po sobie połączeniach mufowych (dla układu o 17 mufach i 26 cm odcinka prostego pomiędzy połączeniami) oraz przepływu  $Q = 400 \text{ dm}^3/\text{h}$ . Widoczne jest, iż po przepływie cieczy przez opór miejscowy rozkład intensywności turbulencji powraca do układu początkowego dopiero bezpośrednio przed następnym oporem miejscowym.

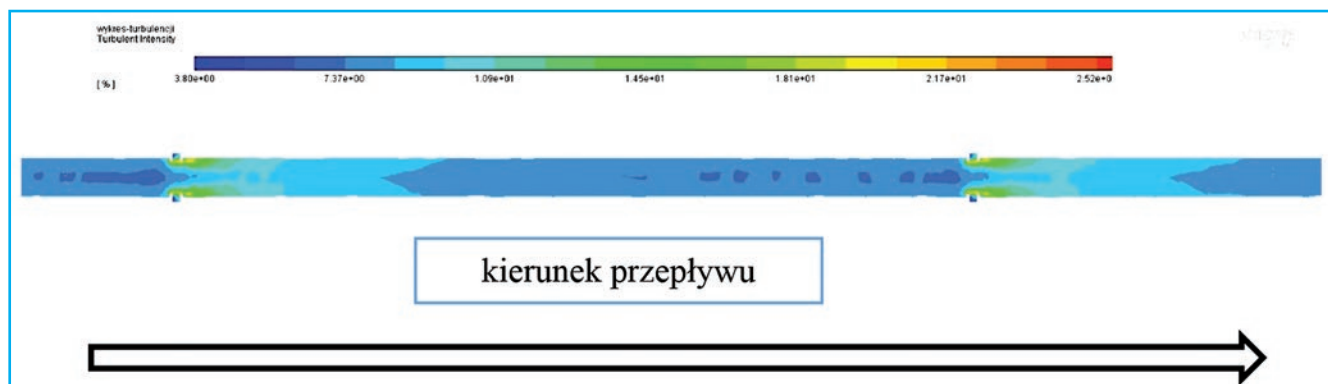
W tab. 3 przedstawia wyniki walidacji obliczeń numerycznych, przeprowadzonej w oparciu o porównanie wartości strat oraz strat oporów miejscowych.

Uzyskane wyniki obliczeń walidacyjnych wskazują na osiągnięcie wymaganej zgodności wyników obserwacji laboratoryjnych z obliczeniami numerycznymi. Współczynnik determinacji, w każdym analizowanym przypadku, jest bardzo wysoki



Rys. 9. Rozkład prędkości średnich dla połączenia 9 muf

Fig. 9. Average velocity distribution for 9 sockets fittings



Rys. 10. Wykres intensywności turbulencji dla dwóch z 17 połączeń przy  $Q = 1000 \text{ dm}^3/\text{h}$  ( $Re \approx 27000$ )

Fig. 10. Turbulence intensity plot for two of the 17 socket connections at  $Q = 1000 \text{ dm}^3/\text{h}$  ( $Re \approx 27000$ )

Tabela 3. Wyniki walidacji obliczeń numerycznych  
Table 3. Validation results of numerical calculations

	2 mufy		3 mufy		5 muf		9 muf		17 muf	
	$\Delta h$	$\Delta h_m$	$\Delta h$	$\Delta h_m$	$\Delta h$	$\Delta h_m$	$\Delta h$	$\Delta h_m$	$\Delta h$	$\Delta h_m$
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9997	0,9767	0,9993	0,9451	0,9995	0,9850	0,9990	0,9807	0,9995	0,9983
<b>NSE</b>	0,8493	0,8276	0,8867	0,7452	0,8700	0,9393	0,7297	0,6586	0,3971	0,0101
<b>RSME</b>	0,8020	0,1218	0,7327	0,1930	0,8345	0,1303	1,2315	0,3459	2,3798	1,3616
<b>RSR</b>	0,3882	0,4152	0,3367	0,5048	0,3606	0,2463	0,5199	0,5843	0,7765	0,9950

(0,9451–0,9999). Wysoki współczynnik efektywności modelu NSE (>0,75) w przypadku rurociągu z 2,3,5 połączeniami świadczy o bardzo dobrej dokładności odwzorowania modelu. Dla rurociągu z 9 mufami jakość oceny jest dobra, a w przypadku 17 muf, jest akceptowalna.

Stosunek błędu średniokwadratowego wyników modelowych do odchylenia standardowego RSR w większości przypadków świadczy o bardzo dobrym (2, 3, 5 muf) oraz dobrym (9 muf) odwzorowaniu modelu. Wyjątkiem jest rurociąg z 17 mufami, gdzie wartości RSR przekraczają próg 0,7.

W tab. 4 zestawiono wartości minimalne i maksymalne współczynnika oporu miejscowego, pomierzone i podawane przez producenta rur oraz porównanie całkowitej sumy współczynników oporu miejscowego.

Wartość współczynnika strat miejscowych dla połączenia mufowego nierozłącznego zgrzewanego przewodów instalacyjnych PP-R, wynikająca z przeprowadzonego eksperymentu, jest w każdym przypadku wyższa od deklarowanej przez producenta. Wartości uzyskane drogą pomiarów laboratoryjnych dla tej samej liczby połączeń różnią się od wartości przyjmowanych do projektowania, z uwagi na wykazany fakt zależności od liczby Reynoldsa. Zaobserwowane wartości współczynników oporów miejscowych dla pojedynczych badanych połączeń mufowych

Tabela 4. Zestawienie wartości minimalnych, maksymalnych współczynnika oporu miejscowego, pomierzonego i podawanego przez producenta oraz sum współczynników oporu miejscowego i długości wpływu oporu

Table 4. Minimum and maximum values of the minor loss coefficient, measured and given by the manufacturer, and the sum of the local resistance coefficients as well as length of minor loss influence

Liczba muf	–	Dane pomierzone			Dane do projektowania		
		$\zeta$	$l_o$	$\Sigma\zeta$	$\zeta$	$l_o$	$\Sigma\zeta$
		(-)	(m)	(-)	(-)	(m)*	(-)
2	min.	0,81	0,228	1,62	0,25	0,0825	0,50
	maks.	3,60	0,749	7,20			
3	min.	0,65	0,184	1,95	0,25	0,0825	0,75
	maks.	2,41	0,503	7,23			
5	min.	0,54	0,153	2,70	0,25	0,0825	1,25
	maks.	1,64	0,341	8,20			
9	min.	0,34	0,096	3,06	0,25	0,0825	2,25
	maks.	0,89	0,188	8,01			
17	min.	0,43	0,121	7,31	0,25	0,0825	4,25
	maks.	0,78	0,164	13,26			

\* dla  $\lambda = 0,02$

oraz suma współczynników dla wszystkich połączeń na danym przewodzie różnią się od siebie, nawet w przypadku, gdy odległość pomiędzy połączeniami jest uznawana jako niewywierająca wpływu, szacowanego jako połowa długości równoważnej oporu miejscowego, czyli 8,25 cm dla danych przyjmowanych do projektowania. Rzeczywiste sumy współczynników oporów miejscowych dla badanych połączeń są nawet trzykrotnie wyższe niż wartości przyjmowane do obliczeń oporów miejscowych [6, 14, 26]. Widać wyraźnie, iż często pomijany współczynnik strat miejscowych połączeń równoprzelotowych może mieć wpływ na wysokość całkowitych strat miejscowych instalacji wewnętrznej, wykorzystującej zgrzewane przewody PP-R.

#### 4. Wnioski

- Przeprowadzone badania umożliwiły określenie wartości współczynników strat oraz charakterystyki hydraulicznej przewodu PP-R, jak i wpływ wielokrotnych połączeń mufowych na spadek ciśnienia na określonej długości rurociągu.
- W przeprowadzonych badaniach wykazano, iż współczynnik oporu miejscowego zgrzewanego połączenia równoprzelotowego nie ma stałej wartości. Wartość współczynnika oporu miejscowego maleje wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa.
- Przeprowadzone badania sugerują, iż sumaryczna wartość  $\zeta$  nie odpowiada sumie wartości współczynników rozpatrywanych oporów miejscowych.
- Przeprowadzona analiza statystyczna wykazała istotny statystycznie wpływ ilości zastosowanych połączeń równoprzelotowych na wartość strat miejscowych, współczynników oporów miejscowych oraz oporności hydraulicznej przewodów.
- Analiza przeprowadzona w programie Ansys umożliwiła zobrazowanie zakresu turbulencji oraz wysokości prędkości występującej za połączeniem mufowym, a obliczenia walidacyjne potwierdzają dopasowanie wartości wyników badań w laboratorium do wyników w programie numerycznym Ansys.
- W praktyce inżynierskiej, często przy projektowaniu instalacji nie uwzględnia się strat na połączeniach, tym bardziej turbulencji za tymi przeszkodami. Biorąc pod uwagę, że wartości współczynników oporu miejscowe dla połączeń równoprzelotowych podane przez producentów mogą w rzeczywistości okazać się niedoszacowanymi, może to prowadzić do błędów przy projektowaniu instalacji.

#### LITERATURA

- [1] Annan M., Gooda E. 2018. "Effect of minor losses during steady flow in transmission pipelines – Case study. Water transmission system upgrade in Northern Saudi Arabia", *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57(4):4299–4305.
- [2] Ansys. Inc., 2018. *Ansys Fluent User's Guide*. Release 19.0.
- [3] Cisowska I., Kotowski A. 2004. „Straty ciśnienia w układach kształtek z polipropylenu”, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, vol. 10:340–345.
- [4] Dul K., Widomski M., Musz-Pomorska A., 2015. „Analiza numeryczna przepływu wody przez zawór kulowy zamontowany na przewodzie PEX-Al-PEX”, *Instal*, vol. 11: 36–39.
- [5] Grajper P., Smółka J. 2010. „Eksperymentalne i numeryczne określenie miejscowych strat ciśnienia w kolanach 90° instalacji wodociagowych”, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, vol. 7-8:13–19.
- [6] Hydro Plast. Katalog techniczny.
- [7] Kalenik M., Witowska B. 2007. „Badania miejscowych oporów hydraulicznych w kształtkach z PVC”, *Architectura*, vol. 6(3):15–24.
- [8] Launder B.E., and Spalding D.B. 1974. "Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc.", *Letters in Heat and Mass Transfer*, vol. 1(2): 131–138.

- [9] Ligaj K., Widomski M.K., Musz-Pomorska A. 2019. "Minor pressure losses for different connections of PP-R and PEX/Al/PEX installation pipes", *E3S Web of Conferences*, vol. 100:1–8.
- [10] Melichar J., Háková J., Veselský J., Michlík L. 2006. "Local Head Loss of Plastic Pipeline Joint Welded by Butt Fusion", *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, vol. 54(3):299–308.
- [11] Minkowycz W.J., Abraham J.P., Sparrow E.M. 2009. "Numerical simulation of laminar breakdown and subsequent intermittent and turbulent flow in parallel-plate channels: Effects of inlet velocity profile and turbulence intensity", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52(17-18):4040–4046.
- [12] Moallemi N., Brinkerhoff J.R. 2016. "Numerical analysis of laminar and transitional flow in a planar sudden expansion", *Computers & Fluids*, vol. 140:209–221.
- [13] Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Binger R.L., Harmel R.D., Veith T.L. 2007. "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations", *Transactions of the ASABE*, vol. 50:885–90.
- [14] Mosler P., Melichar J. 2017. "Results of experimental measurements and calculations of pressure losses in HD-PE pipes", 18th International Conference in Transport and Sedimentation of Solid Particles, Praga, Czechy, 233–240.
- [15] Nowakowski E. 1995. „Opory miejscowe w instalacjach wodociągowych”, *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, vol. 29(2):79–83.
- [16] Piechurski F., Wanot D. 2010. „Badanie wpływu połączeń na wzrost współczynnika strat liniowych  $\lambda$  oraz współczynnika chropowatości bezwzględnej  $k$  dla rur instalacyjnych z polipropylenu”, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, vol. 5:18–22.
- [17] Pliźga O., Kowalska B., Musz-Pomorska A. 2016. "Laboratory and numerical studies of water flow through selected fittings installed at copper pipelines", *Rocznik Ochrona Środowiska*, vol. 18(2):873–884.
- [18] PN-76/M-34034:1976 – Rurociągi. Zasady obliczeń strat ciśnienia (norma wycofana), Polski Komitet Normalizacji i Miar.
- [19] PN-B-01706:1992 – Instalacje wodociągowe. Wymagania w projektowaniu (norma wycofana), Polski Komitet Normalizacji i Miar
- [20] PN-EN 1267:2012 Armatura przemysłowa – Badanie oporu przepływu wodą. Polski Komitet Normalizacji i Miar.
- [21] PN-EN ISO 15874-2:2013-06 Systemy przewodów rurowych z tworzyw sztucznych do instalacji wody ciepłej i zimnej — Polipropylen (PP) — Część 2: Rury (z późniejszymi zmianami). Polski Komitet Normalizacji i Miar.
- [22] Poreba K., Kowalczyk W., Widomski M.K., Musz-Pomorska A. 2017. „Charakterystyka oporów miejscowych wybranych zaworów instalacyjnych zamontowanych na przewodach z różnych materiałów”, *Aktualne Zagadnienia W Uzdatnianiu I Dystrybucji Wody Rozdział A Innowacyjne Technologie Ujmowania I Uzdatniania Wody*, vol. 6:29–36.
- [23] Shirazi N.T., Azizyan G.R., Akbari G.H. 2012. "CFD analysis of the ball valve performance in presence of cavitation", *Life Science Journal*, vol. 9(4):1460–1467.
- [24] Siwiec T., Morawski D., Karaban G. 2002. „Eksperymentalne badania oporów hydraulicznych w zgrzewanych kształtkach z tworzyw sztucznych”, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, vol. 2:49–50 and 63–68.
- [25] Strzelecka K., Jeżowiecka-Kabsch K. 2008. „Rzeczywiste wartości współczynnika oporów miejscowych podczas przepływu wody przez skokowe rozszerzenie rury”, *Ochrona Środowiska*, vol. 30(2):29–33.
- [26] Strzelecka K., Jeżowiecka-Kabsch K. 2010. „Rzeczywiste wartości współczynnika strat miejscowych podczas przepływu wody przez nagle rozszerzenie rury”, *Ochrona Środowiska*, vol. 32(1):33–37.
- [27] System instalacyjny Solter PEX, Poradnik techniczny, [www.hydrosolar.pl](http://www.hydrosolar.pl).
- [28] Weinerowska-Bords K. 2014. „Eksperymentalna analiza współczynników oporów lokalnych dla wybranych kształtek i złączek w systemach rur wielowarstwowych”, *Instal*, vol. 6:42–49.
- [29] Wesseling P. 2000. "Principles of Computational Fluid Mechanics". *Springer Series in Computational Mathematics*, vol. 29:167–188.
- [30] Widomski M.K., Musz A., Iwanek M. 2012. „Straty ciśnienia na zaworze antyskażeniowym – badania laboratoryjne i modelowe”, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, vol. 9:380–385. ■