

POLITECHNIKA OPOLSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY



Optymalizacja przepływomierza kolanowego

ROZPRAWA DOKTORSKA

Opracował: mgr inż. Andrzej Mrowiec

Promotor: dr hab. inż. Sławomir Zator prof. P.O.

Opole 2013

SPIS TREŚCI

Spis treści	2
Wykaz ważniejszych oznaczeń	3
Wstęp	5
1. Analiza stanu wiedzy	8
1.1. Przegląd przepływomierzy stosowanych w przemyśle	8
1.2. Przepływomierz kolanowy	18
2. Cel, tezy i zakres pracy	23
3. Badania doświadczalne	24
3.1. Przepływowe stanowisko badawcze	24
3.2. Pomiarów wymiarów geometrycznych badanych kolan	37
3.3. Przepływomierze kolanowe	53
3.4. Wyznaczanie charakterystyk badanych kolan	58
3.5. Testowanie wybranych hipotez statystycznych	76
3.6. Straty ciśnienia w badanych przepływomierzach kolanowych	87
4. Obliczenia numeryczne wybranych przepływomierzy kolanowych	99
5. Porównanie badań doświadczalnych z symulacjami numerycznymi	108
6. Podsumowanie i wnioski końcowe	127
7. Bibliografia	130
Załącznik A	134

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- a - współczynnik proporcjonalności
- A - pole powierzchni przekroju poprzecznego rurociągu o średnicy d
- A_p - współczynnik proporcjonalności
- B - wyraz wolny
- C - współczynnik przepływu przepływomierza kolanowego
- C^* - teoretyczna liczba przepływu
- d - średnica wewnętrzna rurociągu
- d_i - średnica wewnętrzna otworu impulsowego
- d_{aw} - duża oś elipsy wewnętrznej
- d_{bw} - mała oś elipsy wewnętrznej
- D_a - duża oś elipsy
- D_b - mała oś elipsy
- e - owalizacja zewnętrzna przekroju poprzecznego rury
- e_w - owalizacja wewnętrzna przekroju poprzecznego rury
- f - częstotliwość drgań
- g_n - grubość ścianki
- k_e - stała przepływomierza elektromagnetycznego
- k_m - stała wzorcowania przepływomierza
- k_p - współczynnik rozszerzenia
- k_t - współczynnik proporcjonalności przepływomierza
- k_u - współczynnik czułości przepływomierza ultradźwiękowego
- l - długość łuku kolanowego
- Δl - przyrost długości
- L - długość odcinka prostego
- m - masa
- n - liczba pomiarów
- p - ciśnienie statyczne
- p_1 - ciśnienie statyczne na zewnętrznej stronie łuku krzywizny
- p_2 - ciśnienie statyczne na wewnętrznej stronie łuku krzywizny
- p_c - ciśnienie całkowite
- q_v - strumień objętości

- q_m - strumień masy
- r^2 - współczynnik determinacji (dopasowania)
- R - średni promień gięcia kolana
- R/d - względny średni promień gięcia
- Re - liczba Reynoldsa
- t - temperatura
- u_B - niepewność standardowa typu B
- U - niepewność rozszerzona
- U_u - różnica napięć pomiędzy elektrodami
- \mathcal{G} - prędkość przepływu medium ($\mathcal{G} = \mathcal{G}_{sr}$)
- w - wykładnik potęgi
- x, y - współrzędne w układzie prostokątnym

Litery greckie

- β - przewężenie zwężki
- δ - błąd względny
- Δ_g - błąd graniczny
- ΔV - przyrost objętości
- Δp - ciśnienie spiętrzenia na kolanie przepływomierza (ciśnienie różnicowe $\Delta p = p_1 - p_2$)
- Δp_s - strata ciśnienia na przepływomierzu kolanowym
- ζ - zastępczy współczynnik strat miejscowych
- μ - współczynnik lepkości dynamicznej
- ν - kinematyczny współczynnik lepkości
- ρ - gęstość cieczy
- σ - odchylenie standardowe
- τ - czas

WSTĘP

W metrologii energetycznej pomiary strumienia masy i objętości płynów, obok pomiarów temperatury, należą do grupy najważniejszych i najczęściej wykonywanych w praktyce przemysłowej i laboratoryjnej [26, 34, 35, 43, 44, 46, 51, 61, 68, 72, 73]. Coraz powszechniejsze stosowanie paliw i surowców w postaci ciekłej zwiększa znaczenie parametrów medium oraz strumienia przepływającego płynu, które są ściśle związane z rozliczeniem pod względem ekonomicznym prowadzonego procesu technologicznego, sprawnością maszyn i urządzeń energetycznych, czyli ogólnie rozumianą gospodarką energetyczną operującą strumieniami energii. Ponadto we wszystkich prowadzonych pracach naukowo-badawczych związanych z przepływami różnych substancji, niepewność określenia ilości płynu decyduje niejednokrotnie o przydatności metody i sukcesie w wykonywanych badaniach doświadczalnych. Z tymi zagadnieniami wiążą się również problemy związane z właściwościami metrologicznymi zastosowanych przyrządów pomiarowych, przede wszystkim doбором ich zakresu pomiarowego i czułości aparatury pomiarowej [5, 9, 27, 45, 61].

Zjawiska fizyczne, w oparciu o które mierzone są parametry przepływu, są bardzo złożone i często trudne do ujęcia analitycznego. Równania określające wartość strumienia płynu (masy i objętości) najczęściej wyrażane są w zależności od prędkości średniej strumienia lub innego parametru związanego z mierzoną wielkością. Dlatego tak dużą rolę odgrywają badania doświadczalne i modelowanie matematyczne przepływu, których celem jest weryfikacja rozwiązań analitycznych [30]. Obecnie do pomiarów przepływu stosowane są przepływomierze o zróżnicowanych możliwościach aplikacyjnych i różnorodnych zasadach działania.

Ogólnie wszystkie przepływomierze dzieli się na dwie zasadnicze grupy. Do pierwszej grupy należą przyrządy pozwalające na określenie chwilowego strumienia masy lub objętości. Do tej grupy zalicza się rurki spiętrzające, zwężki, przepływomierze ultradźwiękowe, elektromagnetyczne i inne. Do drugiej grupy zalicza się przyrządy lub urządzenia, które pozwalają na określenie tylko uśrednionego strumienia w czasie obserwacji. Należą do tej grupy przepływomierze zliczające, czyli liczniki przepływu. Biorąc pod uwagę, jako kryterium podziału przepływomierzy, fizyczne zasady ich działania, wyodrębnić można wiele grup, w tym grupę przepływomierzy które wykorzystują spiętrzenie ciśnienia w rozważanej strudze płynu.

Pomiary przepływu w tej grupie opierają się na pomiarze różnicy ciśnień, która powstaje na elemencie spiętrzającym (zwężka, kryza, rurka piętrząca, rurka uśredniająca) lub jest wynikiem występowania siły bezwładności związanej ze zmianą kierunku przepływu płynu (przepływomierze kolanowe i Coriolisa) [16, 43, 46, 65]. Ponieważ dla użytkownika częstym kryterium przy wyborze przepływomierza jest jego niezawodność, możliwość współpracy z układami automatyki w danych warunkach pomiarowych oraz cena, a w dalszej kolejności dokładność pomiaru, dlatego przepływomierze bazujące na spiętrzeniu strugi znalazły najszersze zastosowanie. Z tej grupy przepływomierze typu zwężki, kryzy i dysze pomiarowe są najliczniej reprezentowane w praktyce przemysłowej z uwagi na jednoznacznie znormalizowanie warunków ich budowy i montażu [26, 43, 46, 61]. W tej grupie przepływomierzy, występują dodatkowe opory hydrauliczne o znacznej wartości, w stosunku do przepływomierzy wykorzystujących rurki piętrzące czy uśredniające ciśnienie dynamiczne.

Na uwagę zasługuje mało rozpowszechniona metoda wykorzystująca siły bezwładności płynącego medium. Zastosowana jest w przepływomierzach masowych Coriolisa. Innym rozwiązaniem wykorzystującym tą metodę, a niedocenianym jest przepływomierz kolanowy. Elementem pomiarowym przepływomierza jest kolano rurowe, które może być elementem instalacji przemysłowej. Kolano nie posiada części wewnętrznych zaburzających przepływ, a więc nie powoduje dodatkowych strat ciśnienia i może być stosowane do pomiarów w obydwu kierunkach przepływu. Nieznaczne straty ciśnienia, spowodowane zmianą kierunku przepływu o kąt 90° , są przypisane kolanu jako elementowi instalacji, a nie kolanu jako przyrządowi mierniczemu. W nierzadkich przypadkach może to być jedyna metoda pomiarowa [35, 50, 65]. Przepływomierze kolanowe charakteryzuje: prosta budowa, niskie koszty realizacji, szeroki zakres zastosowania, wysoka niezawodność. lecz jako przyrząd pomiarowy wymagają indywidualnego kalibrowania inną uznaną metodą pomiarową. Występująca pomiarowa różnica ciśnień jest mniejsza niż w przepływomierzach zwężkowych, jest ona rzędu do kilkuset Pascali przy średnich prędkościach strumienia cieczy wnoszących ok. $0,5 \div 1$ m/s w zależności od wymiarów geometrycznych stosowanych kolan pomiarowych. Obecny jakościowy rozwój przetworników do pomiaru różnicy ciśnień, udoskonalenie technik pomiarowych, pozwala na uzyskanie wysokiej dokładności i powtarzalności pomiarów różnicy ciśnień przy relatywnie

niskich kosztach. Zasadniczo koszty przepływomierza kolanowego ograniczają się do kosztów samego przetwornika różnicy ciśnienia i jego zainstalowania.

Z ww. względów przepływomierze kolanowe zasługują na większe rozpropagowanie w układach pomiarowych, szczególnie tam, gdzie głównym kryterium ich zastosowania są możliwości techniczne, a w mniejszym stopniu koszt inwestycji.

1. ANALIZA STANU WIEDZY

1.1. Przegląd przepływomierzy stosowanych w przemyśle

Przepływomierze są przyrządami służącymi do pomiaru strumienia masy lub objętości płynu, traktowanego jako ośrodek ciągły i jednorodny. Podstawowa grupa przepływomierzy instalowana jest w rurociągach zamkniętych wypełnionych płynem w całym przekroju. Ponieważ pomiary strumienia należą do grupy najtrudniejszych pomiarów, dlatego w instalacjach przemysłowych zapewnia się odpowiednie warunki dla pomiaru strumienia przepływającego płynu. Wymaga się, aby struga płynu była ustabilizowana i zakłada się, że profil prędkości jest zbliżony do profilu teoretycznego [12, 25, 40]. Warunki takiego ustabilizowanego przepływu zapewniają z reguły, wymagania dotyczące prostych odcinków rurociągów przed i za przepływomierzem.

W zależności od rodzaju przepływomierza, wymagane są odcinki proste o różnych długościach, a dodatkowo wymaga się, aby przed odcinkami prostoliniowymi nie występowały wielokrotnie elementy typu kolano (trójkąt, zawór) powodujące zaburzenie osiowosymetrycznego profilu prędkości. Umieszczenie tych elementów zbyt blisko przepływomierza może powodować generowanie znaczących błędów, które należałoby uwzględnić w ocenie niedokładności pomiaru [15, 46]. Jednak można temu niekorzystnemu zjawisku zapobiec, poprzez zastosowanie dodatkowych elementów w instalacji, w postaci tzw. prostownic strumienia. Wtedy to odcinki proste stabilizujące profil prędkości przed i za przepływomierzem mogą być krótsze od wymaganych. Przykładowo dla zwężek, ich długości mogą być skrócone z 80 średnic do 20 średnic nominalnych rurociągu na dolocie.

Obecnie do pomiarów przepływu stosowanych jest bardzo wiele typów przepływomierzy o zróżnicowanych możliwościach aplikacyjnych i różnych zasadach działania [26, 35, 43, 46, 61, 68]. W pomiarach przemysłowych, przepływomierze można uszeregować według częstości ich wykorzystania. Przy takim podziale kolejne miejsca zajmują przepływomierze: zwężkowe, elektromagnetyczne, turbinowe, masowe (Coriolisa) i ultradźwiękowe.

Przepływomierze zwężkowe są najtańszą i najszerzej wykorzystywaną metodą pomiaru strumienia przepływu polegającą na pomiarze spadku ciśnienia statycznego na różnego rodzaju zwężkach mierniczych wbudowanych w rurociąg osiowosymetryczny całkowicie wypełniony płynem. Do najpopularniejszych zwężek należą: kryzy, dysze oraz zwężki Venturiego. Stosowanie zwężek pomiarowych jest możliwe ze względu na

ich znormalizowanie, obejmujące warunki budowy, instalacji, zakresy pomiarowe (liczbę Reynoldsa), warunki przepływowe oraz stosowane płyny. W przypadku niespełnienia niektórych warunków można stosować specjalne wykonania zwężek, np.: kryza kwadrantowa (odpowiednio ukształtowany wlot, stosowana przy małych liczbach Re), kryza segmentowa (do cieczy zanieczyszczonych) itp.

W przepływomierzach zwężkowych podczas przepływu występują opory hydrauliczne o znacznej wartości, generujące straty ciśnienia, znacznie większe w stosunku do przepływomierzy z rurkami piętrzącymi czy uśredniającymi ciśnienie dynamiczne. Na rys. 1.1. przedstawiono fragment rurociągu z zamontowaną kryzą pomiarową o przytarczowym odbiorze ciśnienia statycznego ze szczelin usytuowanych w bezpośrednim sąsiedztwie tarczy kryzy wewnątrz rurociągu po stronie dopływowej i odpływowej. Dopuszczalne są również inne rozwiązania konstrukcyjne umiejscowienia otworów impulsowych poboru ciśnienia statycznego. Jednym z nich jest tzw. odbiór ciśnienia kołnierzowy, w którym otwory impulsowe znajdują się w odległości 25 mm od kryzy zarówno po stronie dopływowej jak i odpływowej płynu.

Kolejnym rozwiązaniem jest tak zwany odbiór ciśnienia „ d ” i „ $d/2$ ”, w którym otwory impulsowe poboru ciśnienia usytuowano w ten sposób, że po stronie dopływowej pobór ciśnienia jest w odległości „ d ” przed kryzą, a po stronie odpływowej w odległości „ $d/2$ ” za kryzą, która jest bliska położeniu „vena contracta”, gdzie „ d ” jest średnicą wewnętrzną rurociągu.

Dla przepływomierzy zwężkowych strumień objętości płynu idealnego, nieściśliwego, obliczono z równania:

$$q_v = C^* \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (1.1)$$

Natomiast masowe natężenie przepływu płynu idealnego z równania:

$$q_m = C^* \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (p_1 - p_2)} \quad (1.2)$$

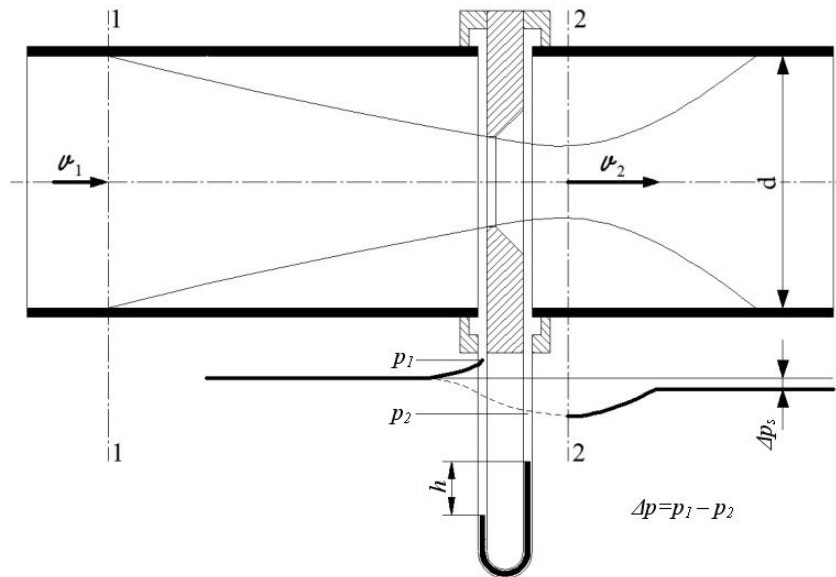
gdzie:

C^* - teoretyczna liczba przepływu - współczynnik zależny od stosunku przewężenia zwężki β i przewężenia strugi,

A - przekrój poprzeczny rurociągu,

ρ - gęstość cieczy,

$p_1 - p_2$ - spadek ciśnienia mierzonego (ciśnienie różnicowe)



Rys. 1.1. Schemat pomiaru przepływu za pomocą kryzy z przytarczowym odbiorem ciśnienia

Do zalet przepływomierzy zwężkowych zalicza się:

- wszechstronne zbadanie i udokumentowanie (stosunkowo wysoka dokładność przy niepewności pomiaru do 0,6% i założeniu pomijalnej niepewności przetwornika różnicy ciśnień),
- prostotę wykonania i wysoką niezawodność,
- duży zakres temperatur i ciśnień mierzonego medium.

Wady przepływomierzy zwężkowych są następujące:

- zwykle duża trwała strata ciśnienia na zwężce,
- wrażliwość na zabrudzenia płynu,
- wrażliwość na zaburzenie profilu prędkości przed przepływomierzem,
- rozkalibrowanie w trakcie eksploatacji (dotyczy głównie kryz),
- niska zakresowość (ok. 3:1).

Wśród przepływomierzy spiętrzających, w których wykorzystywana jest zasada pomiaru strumienia oparta na powstawaniu przy przepływie mierzalnej różnicy ciśnień, możemy wyróżnić poza przepływomierzami spiętrzającymi ciśnienie na wszelkiego rodzaju zwężkach mierniczych także przepływomierze:

- spiętrzające ciśnienie na stożku spiętrzającym,
- kolanowe, w których spiętrzenie ciśnienia jest wynikiem występowania siły bezwładności związanej ze zmianą kierunku przepływu płynu.

Przepływomierze, w których działanie oparto o spiętrzenie ciśnienia na stożku spiętrzającym umieszczonym centralnie wewnątrz kanału osiowosymetrycznego, wykorzystują zasadę zachowania energii w przepływającym płynie. Stożek zmienia i optymalizuje kształt profilu prędkości płynu bez względu na stan przepływu przed nim, co umożliwia jego montaż w niewielkiej odległości za elementami zaburzającymi przepływ. Powstająca przy przepływie (w szerokim zakresie liczb Reynoldsa) różnicę ciśnień, mierzy się pomiędzy wyższym ciśnieniem przed i niższym za stożkiem. Przepływomierz ten charakteryzuje się stosunkowo dużą stratą ciśnienia na stożku pomiarowym, porównywalną do zwężeń mierniczych.

Przepływomierze elektromagnetyczne (indukcyjne) stanowią drugą, dużą grupę przepływomierzy, nadających się do wszelkiego rodzaju cieczy, czystych jak i bardzo silnie zanieczyszczonych, pulp czy zawiesin. Zasada działania przepływomierzy elektromagnetycznych opiera się na zjawisku indukowania siły elektromotorycznej w cieczy przewodzącej prąd (standardowo wymaga się by przewodność elektryczna cieczy była nie mniejsza niż $5 \mu\text{S/cm}$, a w wykonaniu specjalnym nie mniejsza niż $0,1 \mu\text{S/cm}$) [29] i poruszającej się z wyznaczaną średnią prędkością w poprzek linii sił pola magnetycznego o stałej indukcji (rys. 1.2.). Siła elektromotoryczna indukowana w cieczy jest proporcjonalna do średniej prędkości płynu, mierzona za pomocą dwóch elektrod odizolowanych od rurociągu. Przy odpowiednim dobraniu parametrów konstrukcyjnych przepływomierza (powierzchnia wewnątrz rury pomiarowej jest izolowana elektrycznie) i przepływie osiowosymetrycznym w rurociągu, strumień objętości można obliczyć z równania:

$$q_v = k_e \cdot A \cdot U_u \quad (1.3)$$

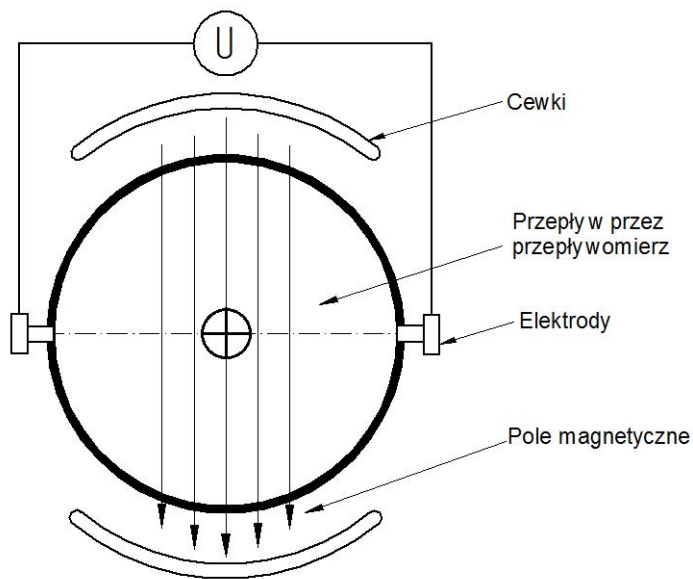
gdzie:

k_e - stała przepływomierza elektromagnetycznego,

A - pole przekroju powierzchni poprzecznej rurociągu,

U_u - różnica napięć pomiędzy elektrodami.

Z zależności tej wynika, że na strumień objętości mają niewielki wpływ takie parametry cieczy jak: gęstość, liczba Re (lepkość), ciśnienie czy temperatura.



Rys. 1.2. Schemat przepływomierza elektromagnetycznego

Zalety przepływomierzy elektromagnetycznych są następujące:

- przepływomierz nie stwarza oporów hydraulicznych (brak elementów zaburzających przepływ),
- wymagana długość prostego odcinka pomiarowego przed przepływomierzem nie przekracza na ogół 5 średnic (przy zachowaniu osiowej symetrii kształtu profilu prędkości),
- brak ruchomych części,
- możliwy do stosowania przy zawiesinach i przepływach wielofazowych cieczy,
- gęstość i lepkość cieczy nie wpływają na dokładność pomiaru,
- duża zakresowość do 50:1 przy niepewności pomiaru do 0,25% górnego zakresu pomiarowego.

Podstawową ich wadą jest to, że nadają się wyłącznie do pomiarów cieczy przewodzących prąd elektryczny.

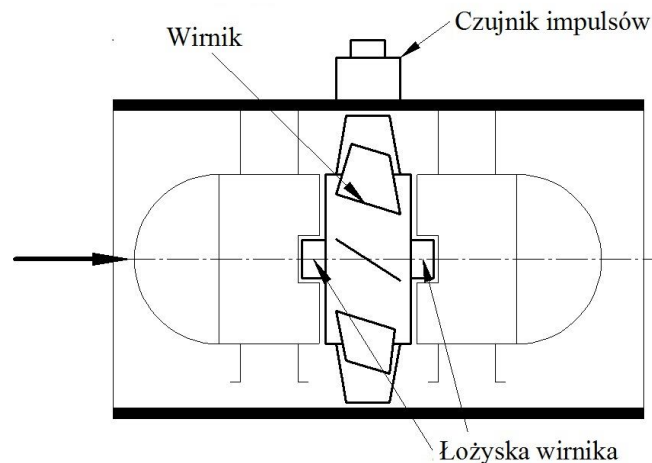
Przepływomierze turbinowe (wirnikowe) stanowią osobną grupę przepływomierzy, w których jest mierzona prędkość obrotowa rotora. Częstotliwość generowana przez czujnik np. przemieszczających się ruchem obrotowym łopat wirnika odpowiada ilości przepływającego płynu (rys. 1.3.). Są to przepływomierze objętościowe, posiadające umieszczony w osi rurociągu rotor turbinki o małej masie z możliwie niewielkim prześwitem łopat od ścianki. Turbinka wprawiana jest w ruch obrotowy poprzez przepływające medium, którego przepływ dzięki prostownicy strumienia wyrównującego płynący strumień, nie jest uzależniony od elementów znajdujących się przed przepływomierzem. Mierzona prędkość obrotowa wirnika turbinki

(np. czujnikiem indukcyjnym) jest wprost proporcjonalna do średniej prędkości przepływającego płynu i jego objętości. Strumień objętości można obliczyć z równania:

$$q_v = k_t \cdot A \cdot n \quad (1.4)$$

gdzie:

- k_t - współczynnik proporcjonalności przepływomierza,
- A - pole powierzchni przekroju poprzecznego rurociągu,
- n - częstotliwość impulsów.



Rys. 1.3. Schemat pomiaru przepływomierzem wirnikowym z osią poziomą

Zalety przepływomierzy turbinowych to:

- niepewność pomiaru 0,5% zakresu (GZP),
- duża zakresowość do 100:1,
- stosowane w porównaniach międzylaboratoryjnych,
- mała stała czasowa, która pozwala mierzyć przebiegi zmienne, chwilowe.

Charakteryzuje się on następującymi wadami:

- wrażliwość na zawirowania strugi - dla uzyskania większych dokładności należy stosować je łącznie z prostownicą strumienia,
- wrażliwość na zmiany lepkości przepływającego czynnika,
- przepływający płyn należy poddawać filtracji – zapobiega to szybkiemu zużyciu łożysk wirnika,
- wymagają regularnego i częstego sprawdzenia własności metrologicznych, połączonych z kalibracją ze względu na zużywanie się łożysk,
- wrażliwość na uszkodzenia wirnika z łożyskami przy nadmiernej prędkości obrotowej i dużych zmianach przepływu.

Pomiary przepływomierzami masowymi opierają się na wykorzystaniu siły Coriolisa spowodowanej równoczesnym występowaniem i nakładaniem się dwóch rodzajów ruchu, postępowego (prostoliniowego) i ruchu obrotowego (wirowego). Wartość siły Coriolisa zależy od przemieszczającej się masy Δm i jej prędkości, a więc od strumienia masy przepływającej cieczy w przepływomierzu. Praktycznie, w masowych przepływomierzach Coriolisa, zamiast wywoływania ruchu wzdłuż łuku (stosowanego we wcześniejszych konstrukcjach), rurkę pomiarową wprowadza się w drgania. Na rys.1.4. przedstawiono przykładowy czujnik przepływomierza składający się z dwóch równoległych rurek pomiarowych, przez które przepływa ciecz, tworząc rodzaj „kamertonu” (rurki przepływomierza wprawiane są w drgania w przeciwfazie). Siła Coriolisa powoduje występowanie nierównomiernych co do wartości momentów na końcach rurek, a powstające przy tym mierzone przesunięcie fazowe częstości drgań, jest proporcjonalne do strumienia przepływającej masy (drgania rury są opóźnione po stronie wlotu a przyspieszone po stronie wylotu). Przepływomierz charakteryzuje się małą niepewnością pomiarów, zwykle na poziomie 0,2...0,4% mierzonej wartości. Natomiast strumień masowy w tym przepływomierzu oblicza się z równania:

$$q_m = k_m \cdot \frac{\theta_w}{\phi} \cdot \frac{1}{f} \quad (1.5)$$

gdzie:

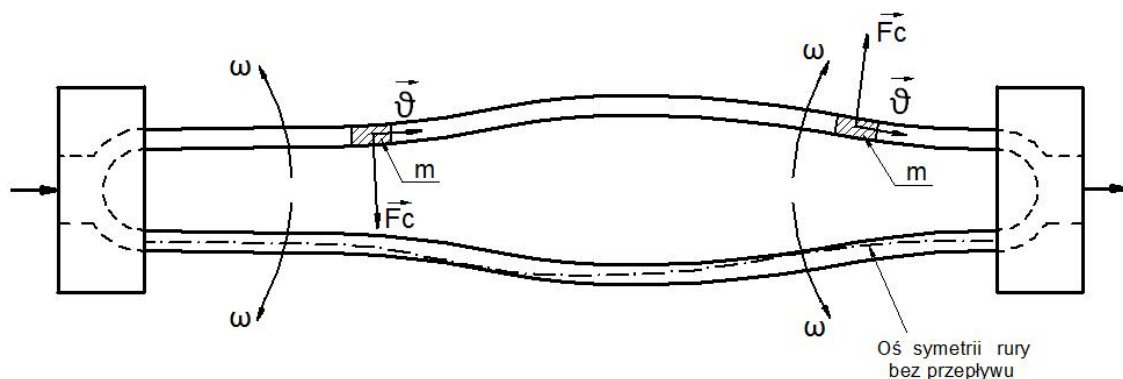
k_m - stała wzorcowania przepływomierza,

θ_w - amplituda drgań wzbudzanych,

ϕ - amplituda drgań wtórnych (wywołanych oddziaływaniem sił Coriolisa),

f - częstotliwość drgań.

Na wskazania przepływomierza nie mają wpływu takie wielkości fizyczne przepływającej cieczy jak: temperatura, lepkość, gęstość, ciśnienie czy przewodność elektryczna.



Rys. 1.4. Schemat pomiaru przepływomierzem masowym Coriolisa

Do zalet przepływomierzy masowych Coriolisa zalicza się:

- dużą zakresowość, powyżej 100:1 przy niepewności pomiaru w granicach 0,1...0,4%,
- bezpośredni pomiar strumienia masy,
- niewrażliwość na zaburzenia profilu prędkości jak i pulsacji przepływu

Wadami są:

- duża trwała strata ciśnienia na przepływomierzu
- wymagana kompensacja temperaturowa (termiczna zmiana wymiarów geometrycznych elementu pomiarowego)

Kolejną grupę, stanowią przepływomierze wykorzystujące do pomiaru strumienia objętości ultradźwięki. Ze względu na zasadę pomiaru rozróżniamy dwa rodzaje przepływomierzy ultradźwiękowych. Pierwszy opiera się na efekcie Dopplera i jest wykorzystywany do pomiaru przepływu płynów zanieczyszczonych. W tym przepływomierzu wyznaczenie prędkości przepływu cieczy polega na pomiarze różnicy częstotliwości fali wysłanej (emitowanej z nadajnika ultradźwiękowego) i fali odbitej od unoszonych się wraz z płynem zanieczyszczeń stałych, czy nieciągłości fazy, związanej z obecnością w płynącej cieczy mikropełcherzyków gazowych.

Drugi rodzaj przepływomierza ultradźwiękowego jest oparty o metodę „Z” (polega na skośnym usytuowaniu w stosunku do osi strugi zespołów nadajnik-odbiornik), dla cieczy jednorodnych stosuje się układ przedstawiony schematycznie na rys. 1.5.. W tym rozwiązaniu nadajnik „a” wysyła skośnie do strugi przepływającej cieczy fale ultradźwiękową do odbiornika „b”, a po jej przejściu w przeciwnym kierunku wysłana jest fala ultradźwiękowa od nadajnika „b” do odbiornika „a”. Oznaczając przez v_{sr} średnią prędkość wzdłuż drogi pokonywanej przez falę, można

wyznaczyć prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej wysyłanej przez nadajnik „a” z prądem strugi, która będzie wynosiła $\mathcal{G}_a = \mathcal{G}_0 + \mathcal{G}_{sr} \cdot \cos \varphi$. Natomiast prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej wysyłanej przez nadajnik „b” pod prąd strugi będzie wynosiła $\mathcal{G}_b = \mathcal{G}_0 - \mathcal{G}_{sr} \cdot \cos \varphi$. Różnicę prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych emitowanych z nadajnika „a” i „b” możemy zapisać w postaci równania:

$$\mathcal{G}_a - \mathcal{G}_b = 2 \cdot \mathcal{G}_{sr} \cdot \cos \varphi \quad (1.6)$$

Z powyższego równania wynika, że różnica $(\mathcal{G}_a - \mathcal{G}_b)$ jest proporcjonalna do średniej prędkości strumienia cieczy, a więc również do strumienia objętości zgodnie z równaniem ciągłości strugi. Znając odległości między nadajnikami i odbiornikami oraz czas przejścia impulsów ultradźwiękowych pomiędzy nadajnikami i odbiornikami, można wyznaczyć prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych \mathcal{G}_a i \mathcal{G}_b oraz średnią prędkość wzdłuż toru pomiarowego \mathcal{G}_{sr} . Strumień objętości mierzony przepływomierzem ultradźwiękowym, można obliczyć z równania:

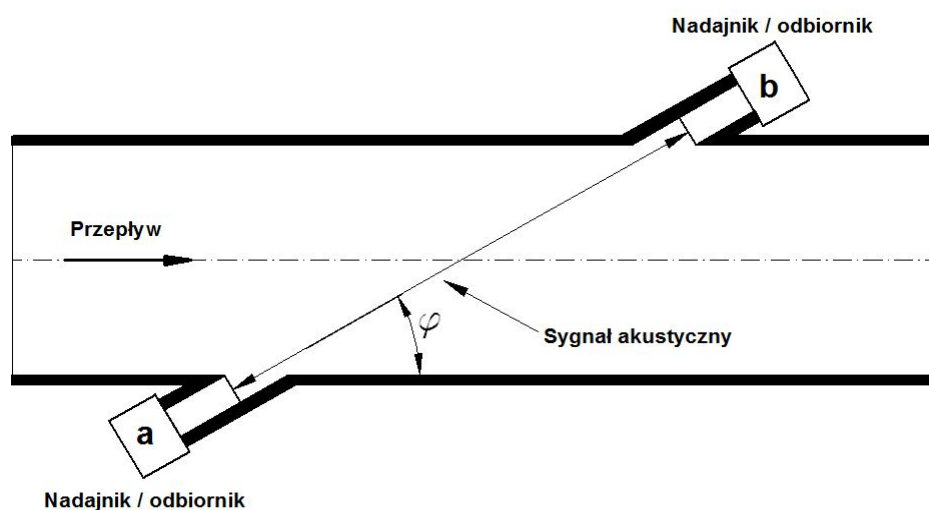
$$q_v = k_u \cdot A \cdot \mathcal{G}_{sr} \quad (1.7)$$

gdzie:

k_u - współczynnik czułości przepływomierza ultradźwiękowego,

A - przekrój poprzeczny rurociągu,

\mathcal{G}_{sr} - prędkość średnia przepływu.



Rys. 1.5. Schemat pomiaru przepływomierzem ultradźwiękowym

Do zalet przepływomierzy ultradźwiękowych zaliczamy to, że:

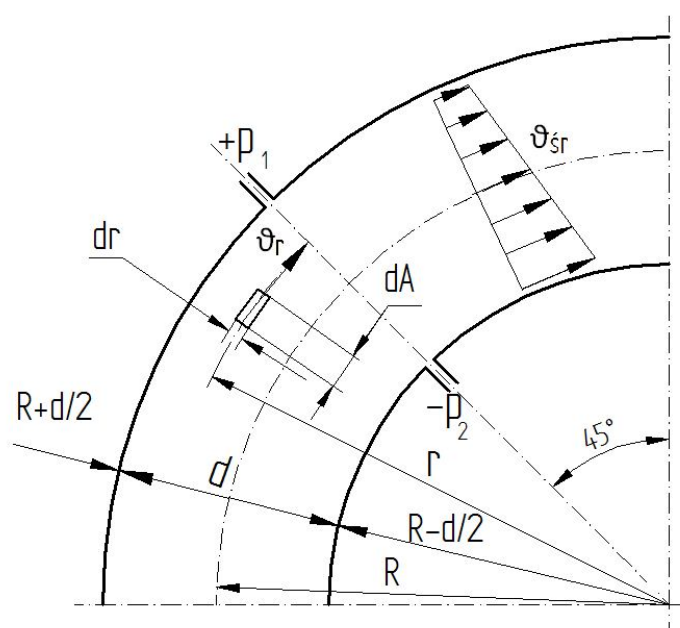
- w zdecydowanej większości przypadków nie wprowadzają dodatkowych oporów przepływu,
- pozwalają na realizację pomiarów przepływu w kanałach o dużych średnicach,
- mogą być stosowane dla gazów (w innym zakresie generowanych częstotliwości)

Natomiast do ich wad zaliczamy to, że:

- występuje możliwość zbierania się powietrza lub zanieczyszczeń w niszach umieszczenia czujnika,
- są wrażliwe na zmiany profilu prędkości, w przypadku jednego toru akustycznego,
- prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej zależy od temperatury, co kompensuje się przez pomiar temperatury płynu,
- mają wysoką cenę w stosunku do innych przepływomierzy,

1.2. Przepływomierz kolanowy

Sposób wyznaczenia strumienia masy w przepływomierzu kolanowym (bezwładnościowym), jest podobny jak w przepływomierzu zwężkowym i polega na wykorzystaniu powstającej różnicy ciśnień pomiędzy stroną zewnętrzną i wewnętrzną kolana rurociągu o stałym przekroju poprzecznym przy przepływie płynu [35, 43, 51, 64, 65, 72]. Jednak zasada fizyczna powstawania ciśnienia różnicowego jest inna, niż w przypadku zwężki. Przy przepływie płynu przez kolano rurowe na skutek działania siły odśrodkowej, występuje wzrost ciśnienia w kierunku odśrodkowym, przy równoczesnym zmniejszaniu się prędkości warstw płynu w tym samym kierunku (rys. 1.6). Powstająca przy tym różnica ciśnień Δp , jaka występuje między łukiem zewnętrznym a łukiem wewnętrznym, jest tym większa im większa jest średnia prędkość przepływu płynu. Dlatego też, mierzona przy przepływie różnica ciśnień Δp , pomiędzy punktami pomiarowymi leżącymi po przeciwnych stronach zakrzywionego kanału osiowoosymetrycznego, może stanowić miarę strumienia masy. Rozważania teoretyczne prowadzone są przy założeniach upraszczających dotyczących przebiegu zjawiska przepływu płynu przez zakrzywione kolano.



Rys. 1.6. Schemat przepływomierza kolanowego

Krzywizna kolana rurociągu o średnicy wewnętrznej d ukształtowana jest jako ćwiartka koła o średnim promieniu gięcia R . Standardowo zalecane punkty pomiaru różnicy ciśnień Δp usytuowane są w przekroju wzdłużnym kolana, na dwusiecznej jego kąta zagięcia, na zewnętrznym i wewnętrznym łuku (rys. 1.6.) w punktach $R_1 = R + d/2$ (pomiar ciśnienia $+p_1$) i $R_2 = R - d/2$ (pomiar ciśnienia $-p_2$). Rozpatrując ruch objętości

elementarnej cieczy (zakładając że, $\rho = \text{const.}$) przepływającej przez kolano, można wyprowadzić równanie określające strumień masy dla bezwładnościowego przepływomierza kolanowego. Dla elementarnej objętości cieczy ($dA \cdot dr$), elementarną siłę dF działającą na elementarną powierzchnię dA , określa się na dwa sposoby i przedstawia równaniem:

$$dF = dF_1 = dF_2 \quad (1.8)$$

Występująca w równaniu (1.8) elementarna siła dF_1 jest wynikiem działania siły bezwładności (siły odśrodkowej) powodującej zmianę przyspieszenia, będącego skutkiem ruchu cieczy przy chwilowej zmianie kierunku prędkości promieniowej, którą wyrażamy za pomocą równania:

$$dF_1 = \rho \cdot \frac{g_r^2}{r} \cdot dr \cdot dA \quad (1.9)$$

Druga z elementarnych sił dF_2 jest wynikiem zmiany gradientu ciśnienia będącego skutkiem przyrostu ciśnienia wzdłuż promienia krzywizny, spowodowanego działaniem siły bezwładności (siły odśrodkowej). Przedstawia się ją równaniem:

$$dF_2 = \frac{dp}{dr} \cdot dr \cdot dA \quad (1.10)$$

Porównując otrzymane równania (1.9) i (1.10) na elementarną siłę, zgodnie z równaniem (1.8) otrzymuje się zależność:

$$\rho \cdot \frac{g_r^2}{r} \cdot dr \cdot dA = \frac{dp}{dr} \cdot dr \cdot dA \quad (1.11)$$

Z równania (1.11) wyznaczamy przyrost ciśnienia dp wzdłuż elementarnej warstwy płynu o grubości dr poruszającej się po łuku o promieniu r i wyrażamy go równaniem:

$$dp = \rho \cdot g_r^2 \cdot \frac{dr}{r} \quad (1.12)$$

Najtrudniej określić jest nieznaną profil rozkładu prędkości płynu w kolanie. Jeżeli przyjmie się, że rozkład prędkości g_r (zależność prędkości od promienia r) jest funkcją prędkości na średnim promieniu gięcia kolana g_R , to dobrym przybliżeniem tego

rozkładu będzie zależność prędkości w funkcji średniej prędkości przepływu \mathcal{G}_{sr} .
Rozważania te dokumentuje się równaniem, które przyjmie postać:

$$\mathcal{G}_r = \mathcal{G}_R \cdot \frac{r}{R} = \mathcal{G}_{sr} \cdot \frac{r}{R} \quad (1.13)$$

Podstawiając wyznaczoną z równania (1.13) wartość \mathcal{G}_r do równania (1.12) otrzymuje się:

$$dp = \rho \cdot \mathcal{G}_{sr}^2 \cdot \frac{r}{R^2} \cdot dr \quad (1.14)$$

Całkowanie równania (1.14) przeprowadza się dla:

- przyrostu ciśnienia dp w granicach od p_1 do p_2 ,
- przyrostu promienia dr w granicach od $R_1 = R + d/2$ do $R_2 = R - d/2$

$$\int_{p_2}^{p_1} dp = \int_{R-d/2}^{R+d/2} \rho \cdot \mathcal{G}_{sr}^2 \cdot \frac{r}{R^2} \cdot dr \quad (1.15)$$

Po scałkowaniu równanie (1.15) przyjmuje postać pozwalającą określić ciśnienie spiętrzenia:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho \cdot \mathcal{G}_{sr}^2 \cdot \frac{d}{R} \quad (1.16)$$

Wyznaczając z równania (1.16) wartość średniej prędkości przepływu \mathcal{G}_{sr} , otrzymamy równanie zależne od wymiarów geometrycznych przepływomierza kolanowego:

$$\mathcal{G}_{sr} = \sqrt{\frac{R}{d}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (1.17)$$

Wyznaczenie prędkości średniej przepływu w przepływomierzu kolanowym prowadzi ostatecznie do wyznaczenia równań na masowe i objętościowe natężenie przepływu, które przyjmują postać:

$$q_m = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \rho \cdot \mathcal{G}_{sr} \quad (1.18)$$

$$q_m = C \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{R}{d}} \cdot \sqrt{\rho \cdot \Delta p} \quad (1.19)$$

$$q_v = C \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{R}{d}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (1.20)$$

gdzie:

C - współczynnik przepływu przepływomierza kolanowego.

Uwzględnia on, w przekroju poprzecznym na dwusiecznej kąta zagięcia kolana, wpływ prędkości przepływu inny niż teoretycznie założony. Na potrzeby pomiarów przemysłowych można go wyznaczyć korzystając z zależności empirycznej [6]:

$$C = 1 - \frac{6,5}{\sqrt{Re}} \quad (1.21)$$

W przypadku wyznaczenia współczynnika przepływu C przepływomierza kolanowego z równania (1.21), podczas pomiarów powstają błędy, które mogą dochodzić do 4%. Są one, przy tym wynikiem nieuwzględnienia dokładności wykonania samego kolana jak i wyznaczenia wymiarów geometrycznych kolana, takich jak średnicy rury d i średniego promienia gięcia R . Dlatego dla równań (1.19) i (1.20) wyznaczonych dla cieczy doskonałej, należałoby wyznaczać doświadczalnie współczynnik przepływu przepływomierza kolanowego C , tak by można było w nim uwzględnić wszystkie uproszczenia zawarte przy wyprowadzaniu zależności zawartych w równaniach (1.13)-(1.21). Dostępne w literaturze wyniki badań wskazują, że zawiera się on w granicach $1 \pm 0,04$ dla rozwiniętego przepływu turbulentnego. Przy zmianie liczby Re w granicach od 10^5 do 10^6 wartość współczynnika przepływu wzrasta o ok. 1%. Dla już opanowanej technologii gięcia kolana, przy zapewnieniu powtarzalności geometrii giętego łuku, można uzyskać zmiany wartości współczynnika przepływu przepływomierza kolanowego C na poziomie $\pm 2\%$ [68]. Przyjmując jednak, według innych danych literaturowych, że wartość współczynnika przepływu C zawiera się w granicach $0,9 \dots 1,1$, to przeprowadzane obliczenia inżynierskie, pozwalają na wyznaczenia przepływu cieczy z niepewnością określaną na $\pm(5 \div 6)\%$, a wg niektórych źródeł nawet na $\pm 10\%$. Wyżej wymienione problemy powodują, że wartość współczynnika przepływu do obliczeń inżynierskich często przyjmuje się jako jeden ($C = 1$), unikając w ten sposób kłopotliwego wzorcowania [43], godząc się przy tym na znaczną niepewność pomiaru strumienia.

Do zalet opisanej metody pomiarowej zaliczamy to, że jest stosunkowo mało wrażliwa na zaburzenia, zmiany wartości liczby Re , pulsacje strumienia czy obecność drugiej fazy. Patrząc jednak, ze względów konstrukcyjnych na ten rodzaj przepływomierza, można stwierdzić, że kolano jako przepływomierz, nie generuje już

dodatkowych strat ciśnienia, gdyż występuje w każdej przemysłowej instalacji jako jej element przepływowy.

Przepływomierzy kolanowych nie zaleca się do stosowania w pomiarach strumienia gazów, ze względu na występowanie przy przepływie siły bezwładności o małej wartości, co skutkuje niewielkim ciśnieniem różnicowym Δp i co za tym idzie dużą niepewnością pomiaru. Dodatkowo w przekroju pomiarowym występuje różnica w gęstość gazu, wskutek ściśliwości między łukiem zewnętrznym i wewnętrznym, co jest dodatkowym źródłem błędów.

Jednak głównym ograniczeniem stosowania przepływomierzy kolanowych, jako przyrządów pomiarowych, jest brak wyznaczonych dokładnych charakterystyk przepływowych, wpływu tolerancji wymiarów kształtu kolana, jako elementu przepływomierza, czy wewnętrznej chropowatości powierzchni. Z tego względu nie można zastosować wzorcowania pośredniego, lecz każdy przepływomierz kolanowy należy kalibrować indywidualnie do celów pomiarowych. W przemyśle przepływomierze kolanowe są stosowane sporadycznie, głównie w energetyce zawodowej (elektrowniach) na rurociągach o średnicach przekraczających 1 m.

W jednej z elektrowni wykorzystano je do pomiaru strumienia masy wody chłodzącej skraplacze turbin parowych [22]. Natomiast w „Elektrowni Bełchatów”, zastosowano je do kontroli i diagnostyki układów filtrujących wodę zasilającą bloki energetyczne.

2. CEL, TEZY I ZAKRES PRACY

Cel pracy

- Opracowanie założeń i wytycznych dla konstrukcji przepływomierzy kolanowych służących do przeprowadzania pomiarów dla kolan o względnym średnim promienia gięcia R/d z zakresu 1,7÷11,5 dla strumienia płynu w zakresie liczby $Re \sim 6000 \div 35000$.
- Weryfikacja doświadczalna i numeryczna badanych przepływomierzy.

Teza pracy

Sformułowano następujące tezy pracy:

- Istnieją, dla danego typu przepływomierza kolanowego, optymalne pod względem metrologicznym miejsca poboru ciśnienia spiętrzenia.
- Istnieje możliwość minimalizacji strat ciśnienia przepływomierza kolanowego.

Zakres pracy

Zakres pracy obejmuje:

- Analizę istniejących rozwiązań oraz publikacji na temat przepływomierzy.
- Projekt i budowę przepływomierza kolanowego.
- Projekt i budowę stanowiska pomiarowego do przeprowadzania badań testowych.
- Określenie charakterystyk metrologicznych przepływomierzy w wybranych warunkach pomiarowych.
- Wykonanie symulacji numerycznych strugi płynu w przepływomierzach kolanowych.
- Analizę wyników badań i oszacowanie niepewności pomiarowych.

3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

3.1. Przepływowe stanowisko badawcze

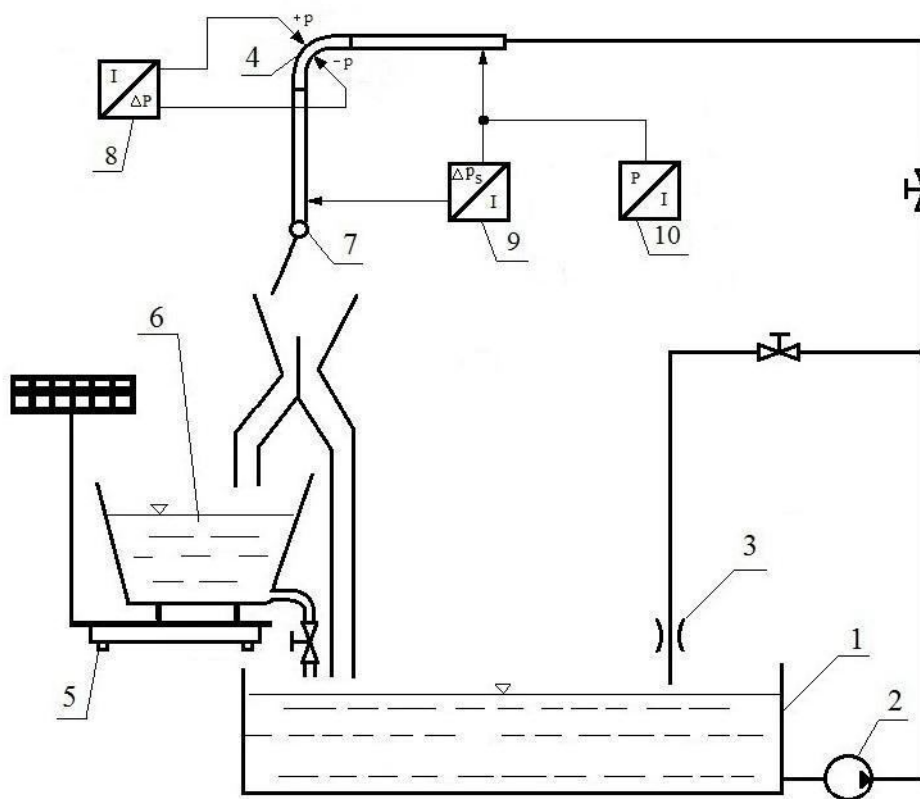
Badania doświadczalne przepływomierzy kolanowych przeprowadzono na specjalnie do tego celu zbudowanym stanowisku badawczym wykorzystującym metodę wagową zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie PN-EN 24185 [47]. Przepływ przez instalację hydrauliczną i badany przepływomierz kolanowy realizowano dwoma metodami:

- a) poprzez wymuszenie pompą wirową (rys. 3.1.1),
- b) wymuszenie ze stałym ciśnieniem statycznym (rys. 3.1.2).

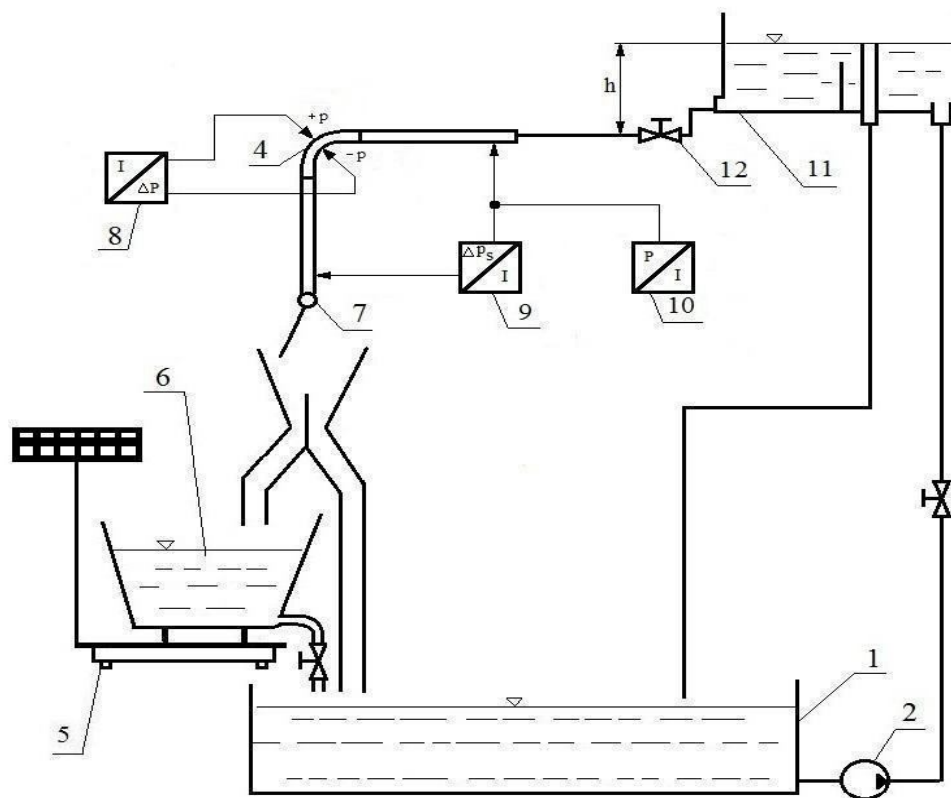
W przypadku wymuszenia pompą wirową, wodę ze zbiornika głównego (1) pompowano pompą wirową (2) przez wodną instalację hydrauliczną z badanym przepływomierzem kolanowym. Strumień objętości w układzie pomiarowym regulowano skokowo kalibrowanymi dławikami (3), oraz poprzez upust części strumienia głównego bezpośrednio do zbiornika głównego (1). W przypadku przepływu ze stałym ciśnieniem wymuszającym, pochodzącym od ciśnienia statycznego, pompa wirowa (2) pompuje wodę ze zbiornika magazynowego (1) do zbiornika zasilającego (11) w którym utrzymywano stały poziom lustra wody h nad badanym przepływomierzem. Strumień objętości w układzie pomiarowym regulowano płynnie zaworem regulacyjno-odcinającym (12).

Na schematach (rys. 3.1.1, rys. 3.1.2 i rys. 3.1.3) wprowadzono następujące oznaczenia:

- 1- zbiornik magazynowy o pojemności ok. 500 dm³,
- 2- pompa wirowa,
- 3- wymienny dławik ograniczający przepływ,
- 4- badane kolano pomiarowe,
- 5- waga elektroniczna WM-150 (max. 150 kg),
- 6- zbiornik pomiarowy o max. pojemności 140 dm³,
- 7- układ przerzutnika,
- 8- inteligentny przetwornik różnicy ciśnień APR-2000 o zakresie 0÷4 kPa,
- 9- inteligentny przetwornik różnicy ciśnień APR-2000 o zakresie 0÷16 kPa,
- 10- przetwornik ciśnienia PR-50 o zakresie 0÷32 kPa,
- 11- górny zbiornik zasilający,
- 12- zawór regulacyjno-odcinający



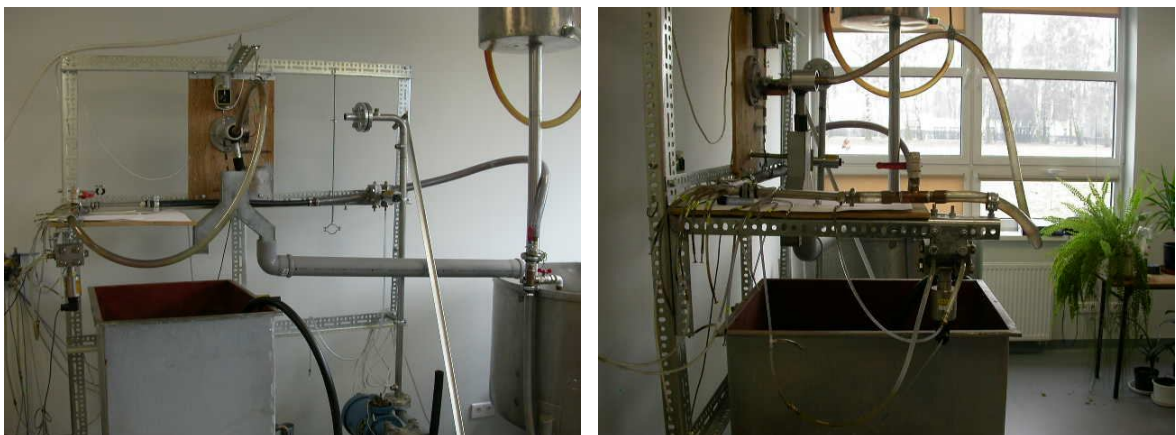
Rys. 3.1.1. Schemat stanowiska pomiarowego z wymuszeniem przepływu pompą wirową



Rys. 3.1.2. Schemat stanowiska pomiarowego z hydrostatycznym wymuszeniem przepływu

Podstawową częścią stanowiska doświadczalnego (wspólną dla obu układów pomiarowych) jest usytuowany w płaszczyźnie poziomej przepływomierz kolanowy (4) (na schematach w celu zobrazowania zasady pomiaru umieszczono go w płaszczyźnie pionowej). Wymieniony przepływomierz wykonano z łuku kolana pomiarowego 90° i połączonych z nim dwóch równych odcinków prostych, z których każdy jest o długości L' , pierwszy jest przed, a drugi za łukiem kolana. Do pomiaru ciśnienia spiętrzenia Δp , czyli różnicy ciśnień na zewnętrznym ($+p$) i wewnętrznym ($-p$) promieniu kolana, podczas przepływu wody użyto inteligentny przetwornik różnicy ciśnień typu APR-2000 (8) o programowanym zakresie pomiarowym $0 \div 4$ kPa. Pomiar straty ciśnienia Δp_s na przepływomierzu odbywał się również inteligentnym przetwornikiem różnicy ciśnień typu APR-2000 (9), o programowanym zakresie pomiarowym $0 \div 16$ kPa. Przy pomiarze straty ciśnienia, punkty poboru ciśnienia: ($+p$) usytuowano w odległości L przed badanym kolaniem a punkt ($-p$) w odległości L za kolaniem (rys. 3. 3. 1). Statyczne ciśnienie wejściowe p na wlocie przepływomierza mierzono analogowym przetwornikiem różnicy ciśnień PR-50 (10) z ustawionym zakresem pomiarowy $0 \div 32$ kPa wykorzystując tylko dodatnie wejście przetwornika mierzące nadciśnienie. Przy pomocy przerytnika (7), przepływającą przez przepływomierz kolanowy wodę, kierowano bezpośrednio do zbiornika głównego (1), a przy pomiarze przepływu metodą wagową do zbiornika pomiarowego (6), który był umieszczony na tarowanej każdorazowo wadze pomiarowej (5).

Na rys. 3.1.3 przedstawiono widok stanowiska pomiarowego przepływu wody przez kolano pomiarowe metodą wagową.



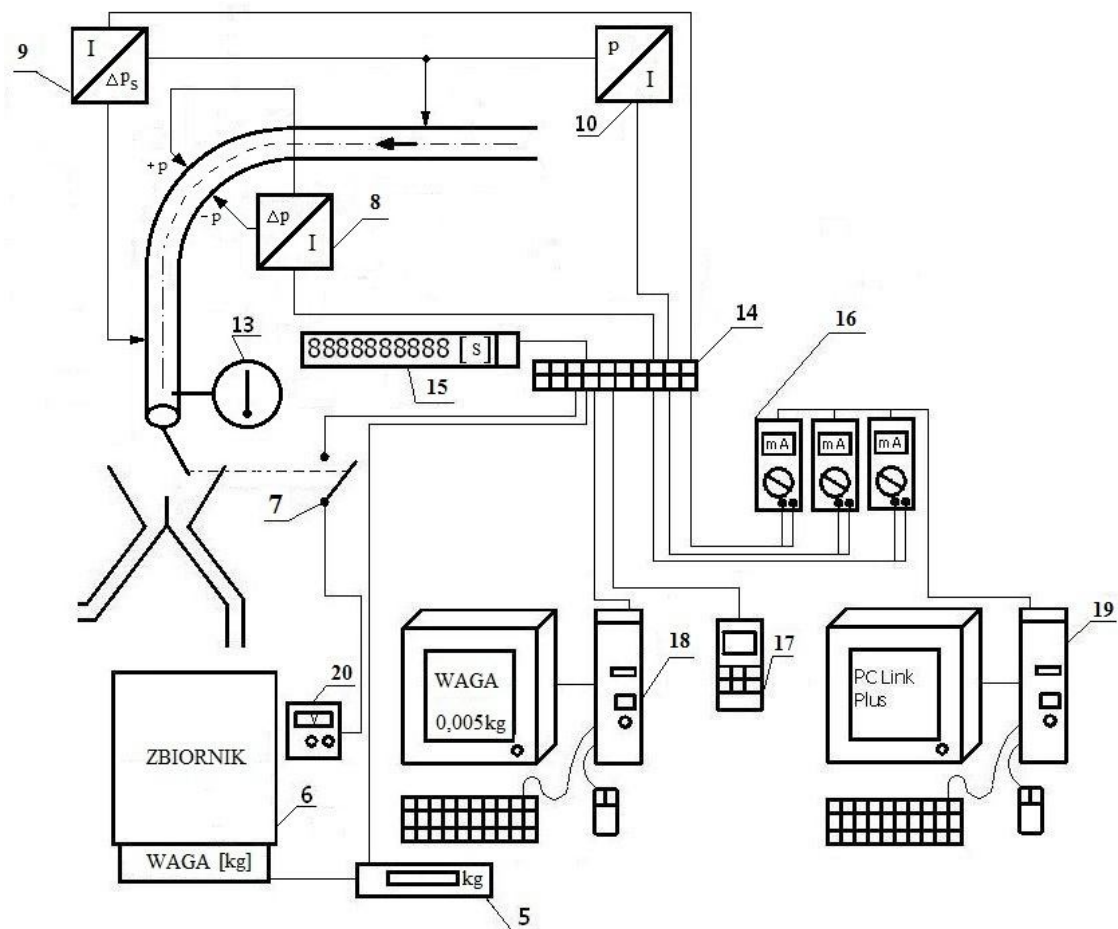
Rys. 3.1.3. Widok stanowiska pomiarowego (część hydrauliczna)

Na rys. 3.1.4 przedstawiono schemat blokowy wykorzystywanego w badaniach doświadczalnych komputerowego układu pomiarowo-rejestrującego do wyznaczania charakterystyk przepływowych badanych przepływomierzy kolanowych metodą wagową.

Pomiary przeprowadzono w trakcie przepływu wody przez układ pomiarowy, kontrolując i rejestrując podczas napełniania zbiornika pomiarowego takie parametry jak: ciśnienie spiętrzenia Δp na kolanie pomiarowym przetwornikiem (8), stratę ciśnienia na przepływomierzu Δp_s przetwornikiem (9), ciśnienie statyczne p przetwornikiem (10) na wlocie przepływomierza, przedział czasowy czasu τ , w którym napełniano zbiornik pomiarowy (6) z błędem granicznym 0,001s sekundomierzem (15), masę m zgromadzonej wody w zbiorniku pomiarowym na wadze (5), temperaturę t płynącej wody termometrem (13). Temperaturę płynącej wody mierzono z błędem granicznym 0,1°C termometrem cyfrowym (13). Masę zgromadzonej wody mierzono wagą elektroniczną WM-150 z błędem granicznym 5g i rejestrowano z użyciem interfejsu RS-232 komputerowego systemu pomiarowego (18).

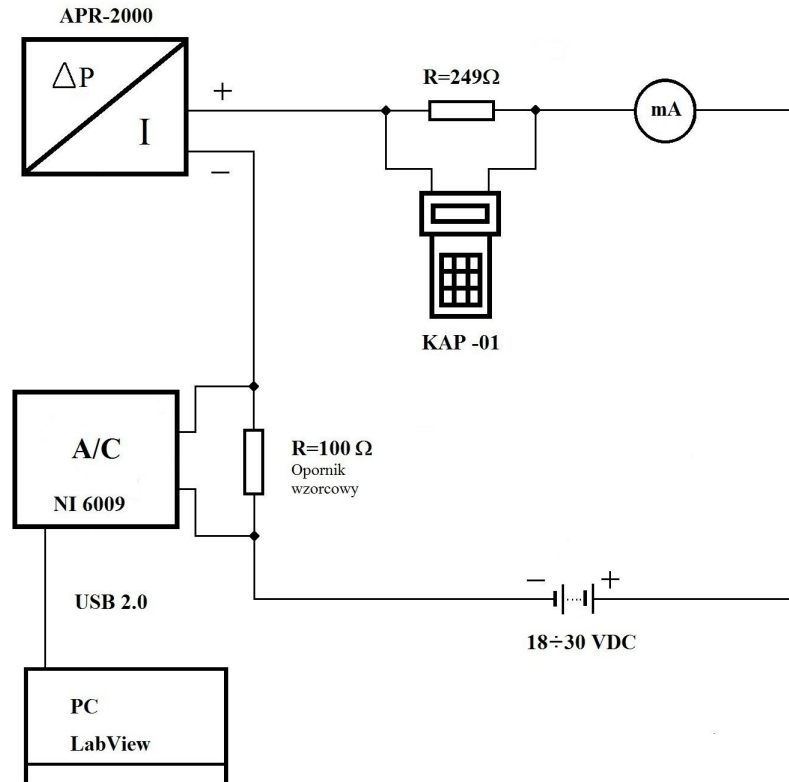
Pomiary ciśnienia spiętrzenia mierzono przetwornikiem różnicy ciśnień (8) z zaprogramowanym 5 sekundowym uśrednianiem z klasą dokładności 0,1% w zakresie pomiarowym 1,2 ÷ 4,0 kPa. Pomiary straty ciśnienia (9) oraz ciśnienia statycznego (10) na przepływomierzu kolanowym mierzono przetwornikami różnicy ciśnień z klasą dokładności 0,16% w zakresie pomiarowym 4,8 ÷ 16 kPa. Przetworniki zasilano w pętli prądowej napięciem 24V DC wykorzystując zasilacz (20). Dla wejściowych sygnałów pomiarowych przetworników różnicy ciśnień o nominalnych zakresach pomiarowych 0 ÷ 4 kPa (8), 0 ÷ 16 kPa (9) i 0 ÷ 16 kPa (10), wyjściowe sygnały prądowe zmieniały się w zakresie 4 ÷ 20 mA DC, gdzie zerowym wartościom ciśnień wejściowych przyporządkowano zawsze wartości prądowe równe 4,0 mA DC. Zmierzone multimetrami cyfrowymi PC-5000 (16) wartości prądowe przesyłano poprzez interfejs szeregowy RS-232C z optoizolacją do komputera PC (19).

Dane pomiarowe zapisywano w pamięci dyskowej komputera z użyciem systemu PC Link Plus w formacie plików CSV, z 10 sekundowym krokiem czasowym, wyświetlając jednocześnie wykres zmian obserwowanych wielkości w czasie rzeczywistym na monitorze komputera w oknie aplikacji. Zarejestrowane dane pomiarowe w formacie CSV z datą i numerem identyfikacyjnym dla dalszej obróbki otwierano w arkuszu kalkulacyjnym Excela, w którym je przetwarzano i szczegółowo analizowano.



Rys. 3.1.4. Schemat blokowy układu pomiarowego-rejestrującego do wyznaczania charakterystyk przepływowych przepływomierzy: 13- termometr cyfrowy, 14- listwa łączeniowa, 15- sekundomierz, 16- multimetry cyfrowe PC-5000, 17- komunikator KAP-01, 18- komputer wagi 19-komputer z oprogramowaniem PC Link Plus, 20- zasilacz DF

Przedstawiony na rys. 3.1.4 układ pomiarowo-rejestrujący pozwalał mierzyć i rejestrować dane pomiarowe z krokiem czasowym nie mniejszym niż 1 sekunda, wynikającym z możliwości rejestracji przez komputerowy system PC Link Plus. W rzeczywistym przepływie cieczy, występowały pulsacje ciśnienia, które również postanowiono zmierzyć. W tym celu, w układzie pomiarowym ciśnienia spiętrzenia na przepływomierzu kolanowym, zastosowano wielofunkcyjny moduł akwizycji danych NI-USB 6009 firmy National Instruments pozwalający rejestrować dane z maksymalną częstotliwością próbkowania 42 kHz (dla jednego kanału pomiarowego).



Rys. 3.1.5. Schemat blokowy układu pomiarowo-rejestrującego z modulem NI-USB 6009

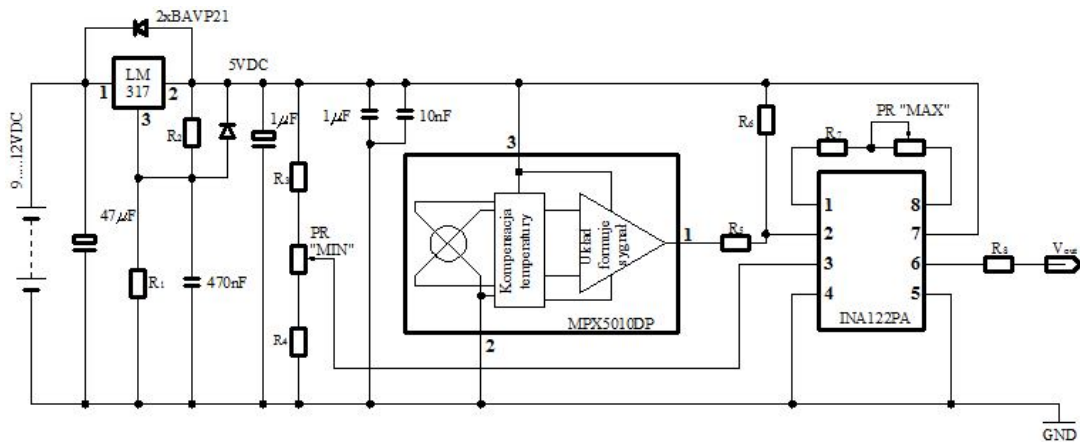
Na rys.3.1.5 przedstawiono pierwszy zmodyfikowany schemat blokowy układu pomiarowo-rejestrującego do zbierania, przetwarzania i przechowywania danych pomiarowych.

W skład układu pomiarowo-rejestrującego wchodzi:

- moduł pomiarowy analogowo-cyfrowy NI-USB 6009 wraz z zainstalowanym na PC oprogramowaniem LabVIEW,
- przetwornik różnicy ciśnień APR-2000 z wyjściem prądowym 4÷20 mA DC,
- komunikator KAP-01 do programowania przetwornika APR-2000,
- miliamperomierz cyfrowy,
- akumulatorowe źródło zasilania.

Użycie do pomiarów ciśnienia spiętrzenia na kolanie pomiarowym inteligentnego przetwornika różnicy ciśnień typu APR-2000, który ze względu na swoją budowę (separatory membranowe) i zastosowaną w nim mikroprocesorową elektronikę z oprogramowaniem uśredniającym wartości chwilowe sygnału, nie pozwoliło mierzyć przebiegów z częstotliwością większą niż 2 Hz, mimo ustawienia czasu uśredniania na zero. Przedstawiony układ pomiarowy pozwala mierzyć tylko tzw. przebiegi

wolnozmiennie. Po dokonaniu pomiarów wstępnych stwierdzono że, układ pomiarowy z rys. 3.1.5. nie spełniał wymagań, ze względu na ograniczoną stałą częstotliwość przetwarzania przetwornika różnicy ciśnień APR-2000. Ta sytuacja wymogła zaprojektowanie i wykonanie do pomiarów szybkozmiennych zmian ciśnienia spiętrzenia, analogowego przetwornika różnicy ciśnień, bez elektronicznego tłumienia sygnału wyjściowego, z wyjściem napięciowym wg schematu przedstawionego na rys.3.1.6.



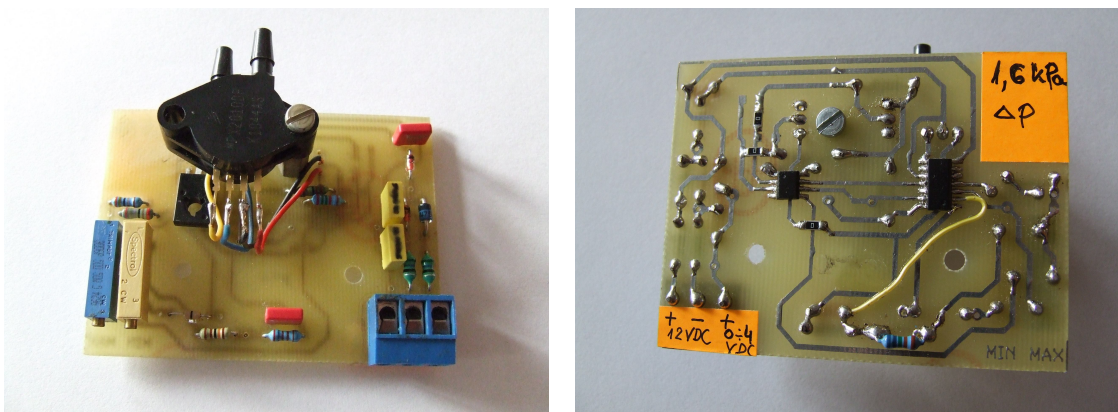
Rys. 3.1.6. Schemat elektroniczny analogowego przetwornika różnicy ciśnień $\Delta p/U$

Jako element pomiarowy użyto czujnik różnicy ciśnień MPX5010DP firmy MOTOROLA o zakresie pomiarowym 0÷10 kPa skompensowany temperaturowo. W układzie elektronicznym wykorzystano precyzyjny wzmacniacz pomiarowy INA122PA, który przy zmianie wejściowego ciśnienia różnicowego w zakresie pomiarowym 0÷1600 Pa na wyjściu przetwornika generował wyjściowy sygnał napięciowy 0÷4 V DC. Wejściowe ciśnienie na króćcu dodatnim przetwornika $\Delta p/U$ wymuszano wykorzystując pneumatyczny zadajnik ciśnienia, służący do kalibracji przetworników ciśnienia, przedstawiono go na rys. 3.1.7. Wyposażony jest on w pompkę ręczną, zawory odcinające, przyłącza i mikromanometr zegarowy szwajcarskiej firmy Revue Thommen AG o klasie dokładności 0,1 w zakresie pomiarowym 0÷10 kPa, który odpowiadał dziesięciu pełnym obrotom wskazówki pomocniczej mikromanometru (100 działek/obr.). Napięciowy sygnał wyjściowy z przetwornika $\Delta p/U$ mierzono, multimetrem cyfrowym PC-5000 firmy SANWA na zakresie pomiarowym 4,9999 VDC z błędem granicznym (0,0015% odczytu +10 cyfr) w temperaturze 23°C ±5°, otrzymane wyniki zaokrąglano do trzeciego miejsca po przecinku.



Rys. 3.1.7. Pneumatyczny zadajnik ciśnienia – tzw. walizka pomiarowa

Widok wykonanego na płytce drukowanej analogowego przetwornika różnicy ciśnień $\Delta p/U$, zasilanego napięciem 9÷12 VDC z akumulatorowego źródła zasilania przedstawiono na rys. 3.1.8. Tak wykonany przetwornik różnicy ciśnień $\Delta p/U$ poddano badaniom, których celem było sprawdzenie kompensacji temperaturowej. Badania przeprowadzono w komorze klimatycznej dla temperatur 20°C i 50°C. Otrzymane w czasie badań wyniki przedstawiono w tabeli 3.1.1.



Rys. 3.1.8. Widok zmontowanego analogowego przetwornika różnicy ciśnień $\Delta p/U$

Tabela 3.1.1. Wyniki badań temperaturowych przetwornika $\Delta p/U$

Lp	P [Pa]	Temperatura 20°C				Temperatura 50°C				U _t [V]	δ_t [%/10°C]
		U ₁ [V]	U ₂ [V]	U ₃ [V]	U _{sr} [V]	U ₁ [V]	U ₂ [V]	U ₃ [V]	U _{sr} [V]		
1.	100	0,249	0,248	0,249	0,249	0,269	0,268	0,268	0,268	0,250	0,158
2.	850	2,115	2,114	2,115	2,115	2,137	2,136	2,136	2,136	2,125	0,175
3.	1600	4,000	3,999	4,001	4,000	4,024	4,023	4,023	4,023	4,000	0,192

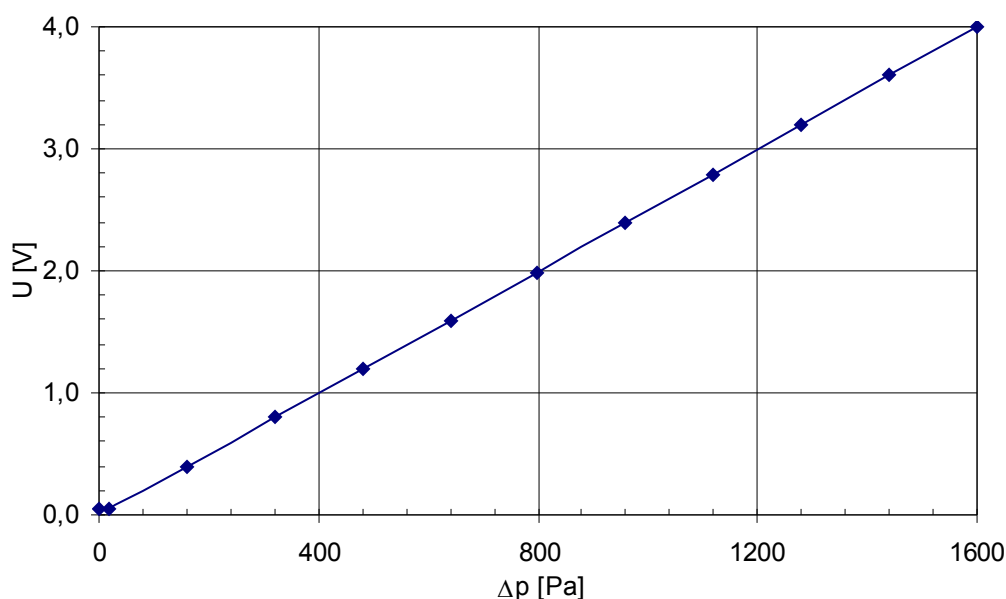
Następnie wykonano kalibrację końcową zbudowanego analogowego przetwornika różnicy ciśnień $\Delta p/U$ w temperaturze $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}$. Uzyskane w czasie badań wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 3.1.2.

Tabela 3.1.2. Wyniki z badań przetwornika $\Delta p/U$ po przeprowadzonej kalibracji

Lp	p [Pa]	U ₁ [V]	U ₂ [V]	U ₃ [V]	U ₄ [V]	U ₅ [V]	U ₆ [V]	U ₇ [V]	U _{sr} [V]	U _t [V]	δ_h [V]	δ_p [%]
1.	0	0,051	0,052	0,050	0,049	0,049	0,050	0,049	0,050	0,000	-0,050	-1,250
1'	20	0,051	0,052	0,050	0,049	0,049	0,050	0,049	0,050	0,050	0,000	0,000
2.	160	0,398	0,400	0,398	0,398	0,399	0,399	0,398	0,399	0,400	0,001	0,036
3.	320	0,796	0,799	0,797	0,796	0,796	0,797	0,796	0,797	0,800	0,003	0,082
4.	480	1,194	1,195	1,194	1,193	1,194	1,194	1,194	1,194	1,200	0,006	0,150
5.	640	1,590	1,592	1,590	1,590	1,591	1,592	1,590	1,591	1,600	0,009	0,232
6.	800	1,991	1,991	1,989	1,988	1,988	1,989	1,989	1,989	2,000	0,011	0,268
7.	960	2,392	2,393	2,392	2,391	2,391	2,392	2,392	2,392	2,400	0,008	0,204
8.	1120	2,795	2,796	2,795	2,794	2,795	2,796	2,794	2,795	2,800	0,005	0,125
9.	1280	3,197	3,199	3,196	3,196	3,197	3,198	3,196	3,197	3,200	0,003	0,075
10.	1440	3,599	3,600	3,598	3,598	3,598	3,599	3,598	3,599	3,600	0,001	0,036
11.	1600	4,001	4,002	4,000	4,000	4,000	4,001	4,000	4,001	4,000	-0,001	-0,014

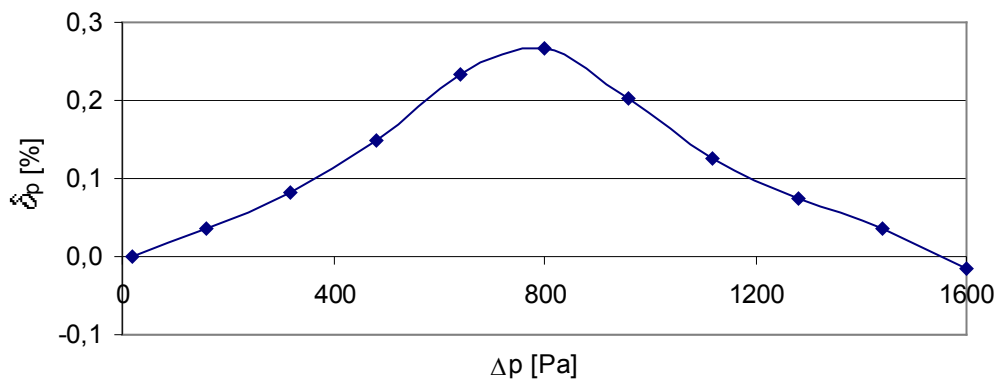
Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że analogowym przetwornikiem $\Delta p/U$ należy mierzyć różnicę ciśnień Δp większą od 20 Pa, z uwagi na występujące poniżej odcięcie napięciowego sygnału wyjściowego o wartości ok.50 mV, które było konsekwencją jednostronnego zasilania wzmacniacza pomiarowego.

Charakterystykę przetwarzania analogowego przetwornika różnicy ciśnień $\Delta p/U$ po wzorcowaniu przedstawiono na rys. 3.1.9.



Rys. 3.1.9. Charakterystyka przetwarzania przetwornika różnicy ciśnień $\Delta p/U$

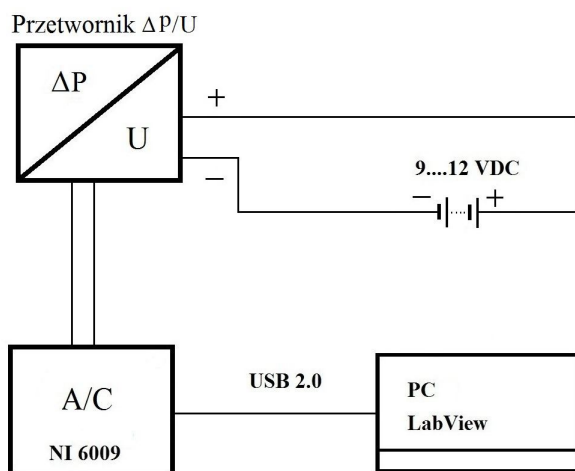
Na rys.3.1.10. przedstawiono rozkład względnego błędu podstawowego przetwarzania analogowego przetwornika różnicy ciśnień $\Delta p/U$ z wyjściem napięciowym po przeprowadzonej kalibracji.



Rys. 3.1.10. Rozkład błęd podstawowego przetwornika różnicy ciśnień $\Delta p/U$

Przetwornik różnicy ciśnienia $\Delta p/U$ charakteryzuje się następującymi parametrami metrologicznymi:

- błąd podstawowy dla zakresu pomiarowego 20÷1600 Pa nie przekracza 0,27 % wartości zakresu,
- błąd temperaturowy po kompensacji nie przekracza 0,2 %/10°C,
- max. wejściowe ciśnienie statyczne mniejsze od 75 kPa,
- rezystancja miernika pomiaru napięcia wyjściowego większa od 10 k Ω ,
- brak elektronicznego członu tłumiącego przenoszony sygnał pomiarowy



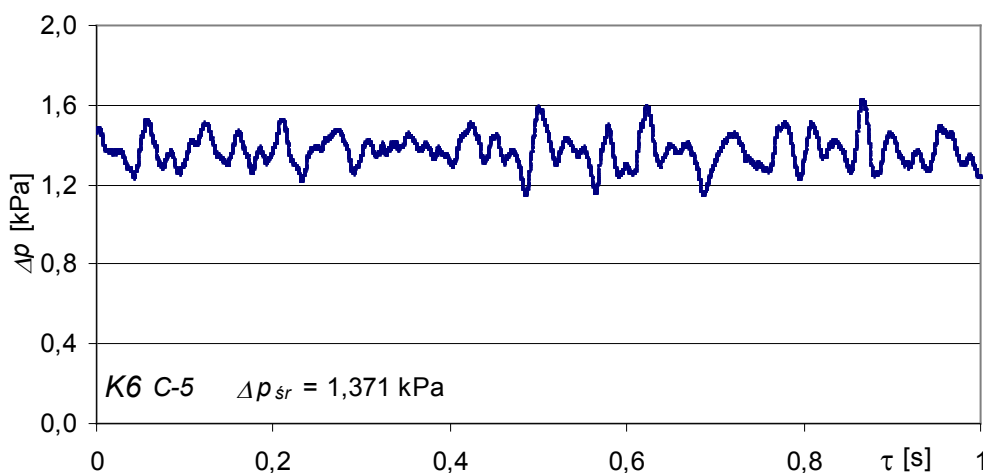
Rys. 3.1.11. Schemat blokowy układu pomiarowego do pomiarów szybkozmiennych zmian ciśnienia spiętrzenia

Na rys. 3.1.11. przedstawiono schemat blokowy układu pomiarowego do pomiarów szybkozmiennych zmian ciśnienia spiętrzenia składający się z:

- pomiarowego modułu analogowo-cyfrowego NI-USB 6009 wraz z zainstalowanym na PC oprogramowaniem LabVIEW,
- analogowego przetwornika różnicy ciśnień $\Delta p/U$ z wyjściem napięciowym $0 \div 4$ V DC, zasilanego z akumulatora.

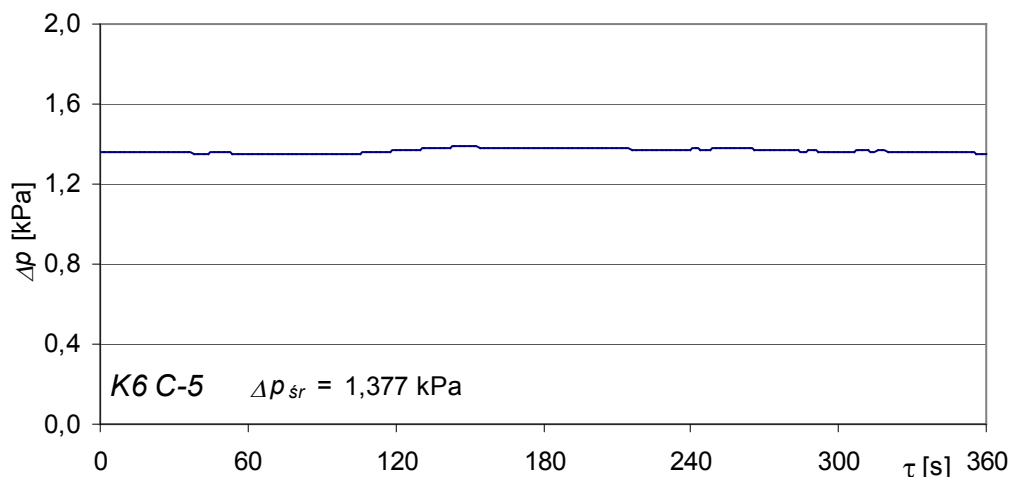
Wykorzystując układ pomiarowy przedstawiony z rys. 3.1.11 wykonywano szereg pomiarów ciśnienia spiętrzenia w wybranych punktach pomiarowych z rys. 3.3.3 badanych przepływomierzy (kolanach pomiarowych) przy przepływie wody.

Na rys. 3.1.12 przedstawiono dla kolana *K-6* w punktach poboru ciśnienia *C-5* przykładowy przebieg rozkładu ciśnienia spiętrzenia w czasie. Pomiary wykonano przy strumieniu cieczy określonym liczbą $Re = 27200$ próbując mierzyć sygnał z częstotliwością 20 kHz. Na zarejestrowanym wykresie zaobserwowano fluktuacje wartości ciśnienia spiętrzenia w przedziale wartości ok. $1,2 \div 1,6$ kPa, a po uśrednieniu w czasie $\tau = 1$ s średnia wartość zarejestrowanego ciśnienia spiętrzenia osiągnęła wartość $\Delta p_{sr} = 1,371$ kPa.



Rys. 3.1.12. Zmierzony przebieg zmian ciśnienia spiętrzenia przetwornikiem $\Delta p/U$ w punktach impulsowych *C-5* kolana *K6* przy ustalonym przepływie z liczbą $Re = 27200$.

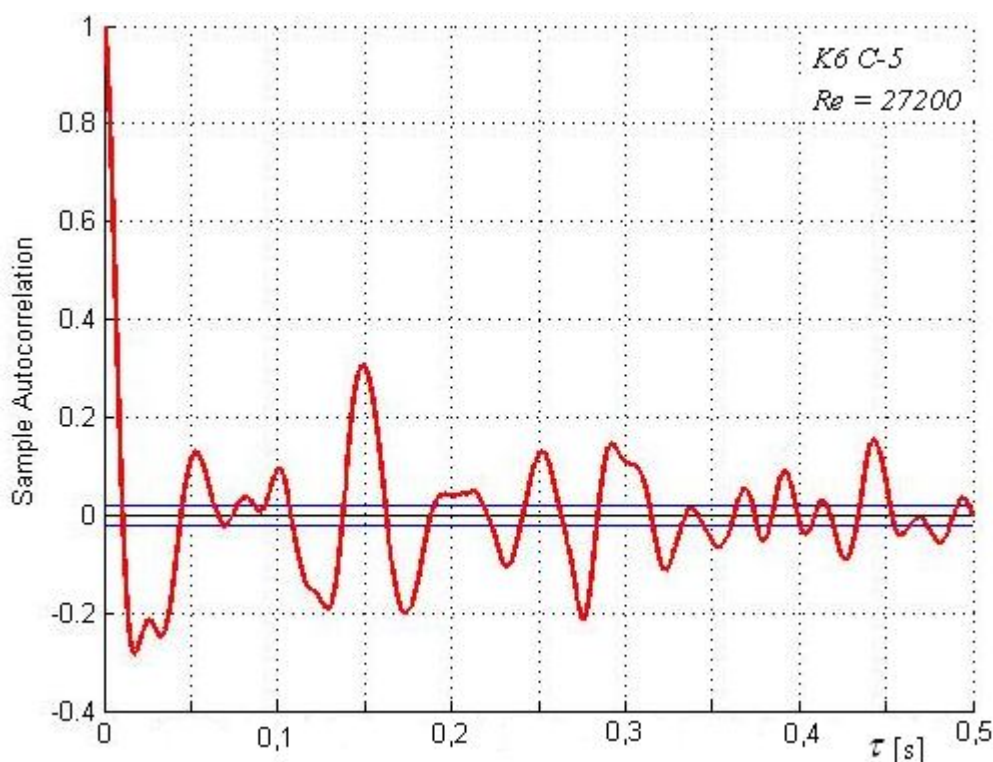
W tym samym czasie, równoległe z przetwornikiem różnicy ciśnienia $\Delta p/U$ (rys. 3.1.8) podłączono do punktów pomiarowych *C-5* badanego kolana *K6*, inteligentny przetwornik różnicy ciśnień typu APR-2000 z zaprogramowaną stałą całkowania wynoszącą 5 s. Przetwornikiem tym mierzono i rejestrowano przebieg zmian ciśnienia spiętrzenia w trakcie pomiaru z czasem próbkowania co 2 s, wyniki przedstawiono w postaci wykresu na rys. 3.1.13.



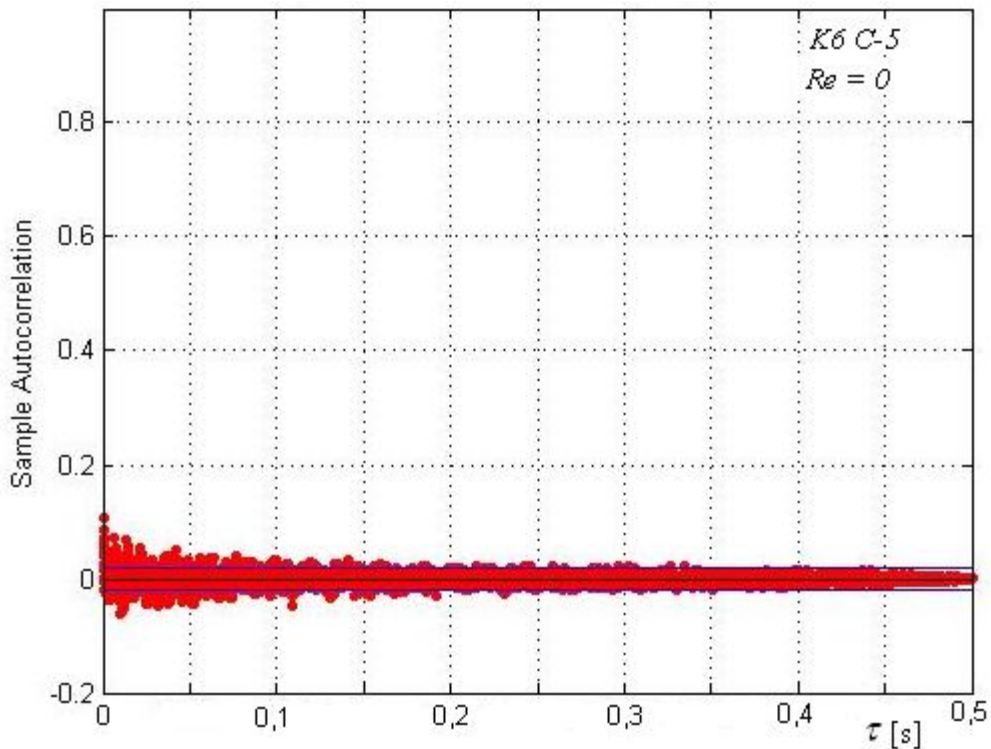
Rys. 3.1.13. Zmierzony przebieg zmian ciśnienia spiętrzenia przetwornikiem APR-2000 w punktach impulsowych C-5 kolana K6 przy ustalonym przepływie z liczbą $Re = 27200$.

Kształt przebiegu ciśnienia spiętrzenia jest praktycznie linią prostą o średniej jego wartości $\Delta p = 1,377$ kPa. Biorąc pod uwagę oba wykresy stwierdzono, że średnie wartości spiętrzenia ciśnienia są do siebie zbliżone, ale nie są wykonane w tym samym czasie, czyli w tych samych warunkach.

Stosując autokorelacje, można ustalić w jakim stopniu wartości sygnału w pewnej chwili, wpływają na wartości sygnału po pewnym czasie w przyszłości.



Rys. 3.1.14. Wykres autokorelacji badanego przebiegu zmian ciśnienia spiętrzenia w punktach impulsowych C-5 kolana K6 przy ustalonym przepływie z liczbą $Re = 27200$



Rys. 3.1.15. Wykres autokorelacji szumu badanego przebiegu pomiaru ciśnienia spiętrzenia w punktach impulsowych C-5 kolana K6 (bez przepływie dla $Re = 0$)

Na rys. 3.1.14 przedstawiono wyznaczoną numerycznie autokorelację przebiegu zmian ciśnienia spiętrzenia z rys.3.1.12 w celu wyszukania okresowości mierzonego sygnału (z własności funkcji autokorelacji wiadomo, że autokorelacja sygnału okresowego jest również funkcją okresową o tym samym okresie). Na przedstawionym wykresie stwierdzono brak istnienia widocznej okresowości sygnału autokorelacji, świadczy to tylko o możliwości powstawania nieokresowych turbulentnych wirów niemożliwych do zarejestrowania.

Na rys. 3.1.15 przedstawiono wykres funkcji autokorelacji szumu badanego przebiegu pomiaru ciśnienia spiętrzenia (przy braku przepływu cieczy, brak jest fluktuacji ciśnienia), której wartość dla czasu $\tau = 0$ wynosi ok. 0,1 i wraz z jego wzrostem maleje do zera.

3.2. Pomiary wymiarów geometrycznych badanych kolan

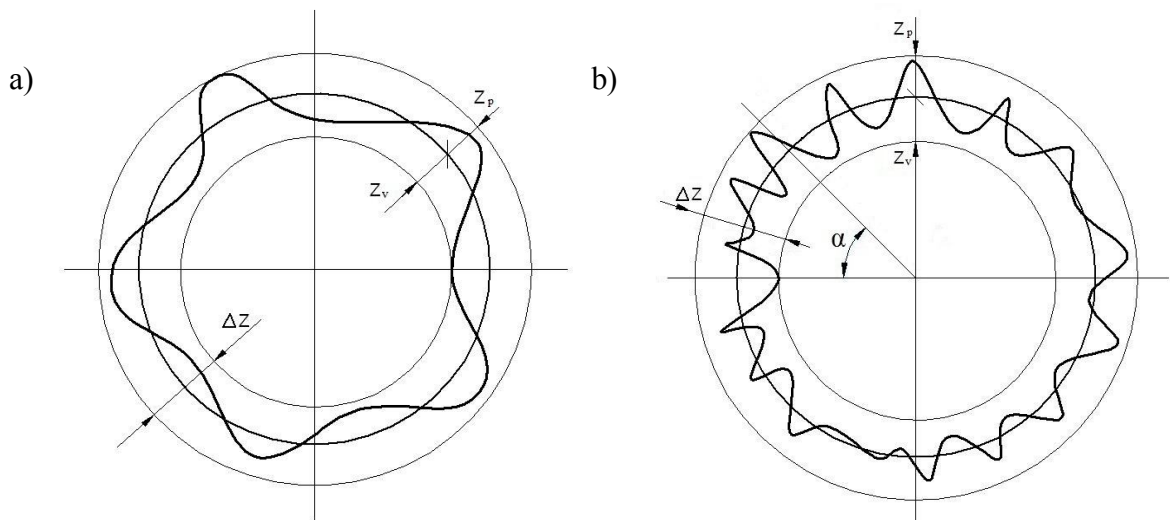
W miarę rozwoju technik i metod pomiarowych można uzyskać pełną identyfikację, wymiarów geometrycznych przewodu rurowego po procesie jego kształtowania, umożliwiając dokonanie oceny zarysu kształtu. Cechą charakterystyczną rzeczywistego zarysu jest to, że zmienność nierówności wynikających z obróbki plastycznej ma charakter losowy. W związku z tym odchyłkę kształtu rozumie się jako różnicę elementu rzeczywistego (powierzchni, zarysu lub linii rzeczywistej) od kształtu odpowiedniego elementu nominalnego (powierzchni, zarysu lub linii nominalnej). Odchyłkę okrągłości można definiować zgodnie z normą ISO/TS 12181-1:2003 [1] względem czterech różnych elementów odniesienia:

- Okrąg średni nazwany również okręgiem Gaussa - okrąg dla którego suma kwadratów odległości od niego do zmierzonego lub przekształconego profilu dąży do minimum (ang. Least Squares Reference Circle – LSC).
- Okręgi najmniejszej strefy – nazwane również okręgami Czebyszewa – dwa współśrodkowe okręgi obejmujące zarys przedmiotu których różnica promieni jest najmniejsza (ang. Minimum Zone Reference Circles – MZC).
- Najmniejszy okrąg opisany, - okrąg o najmniejszej średnicy opisanego na zarysie przedmiotu (ang. Minimum Circumscribed Reference Circle – MCC).
- Największy okrąg wpisany – okrąg o największej średnicy który może być wpisany w zarys przedmiotu (ang. Maximum Inscribed Reference Circle – MIC).

Przyjęcie odpowiedniego okręgu odniesienia jest istotne ze względu na wyznaczenie odchyłki okrągłości, która dla wymienionych powyżej skojarzonych okręgów może znacznie się różnić. Praktyka pomiarowa wykazała, że powszechnie i najczęściej stosowanym okręgiem odniesienia jest okrąg średni – LSC, który jest najbliższy wymiarowi nominalnemu, także ze względu na łatwość jego numerycznego wyznaczenia [1].

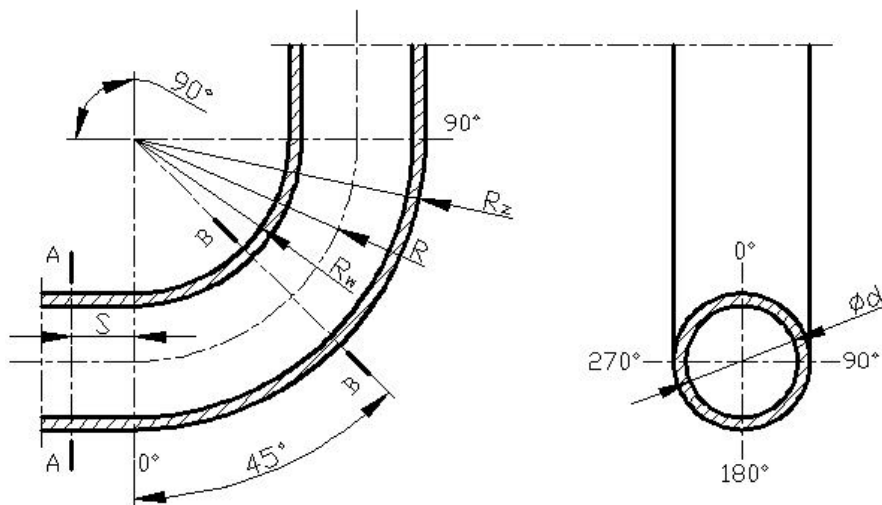
Odchyłkę okrągłości ΔZ która jest podstawowym parametrem okrągłości, określa się jako największą odległość między punktami zarysu rzeczywistego, będącą sumą wartości największego dodatniego wzniesienia Z_p i wartością bezwzględną największego wgłębienia Z_v profilu.

Podział i oznaczenia graficzne odchyłek okrągłości przedstawiono na rys. 3.2.1.



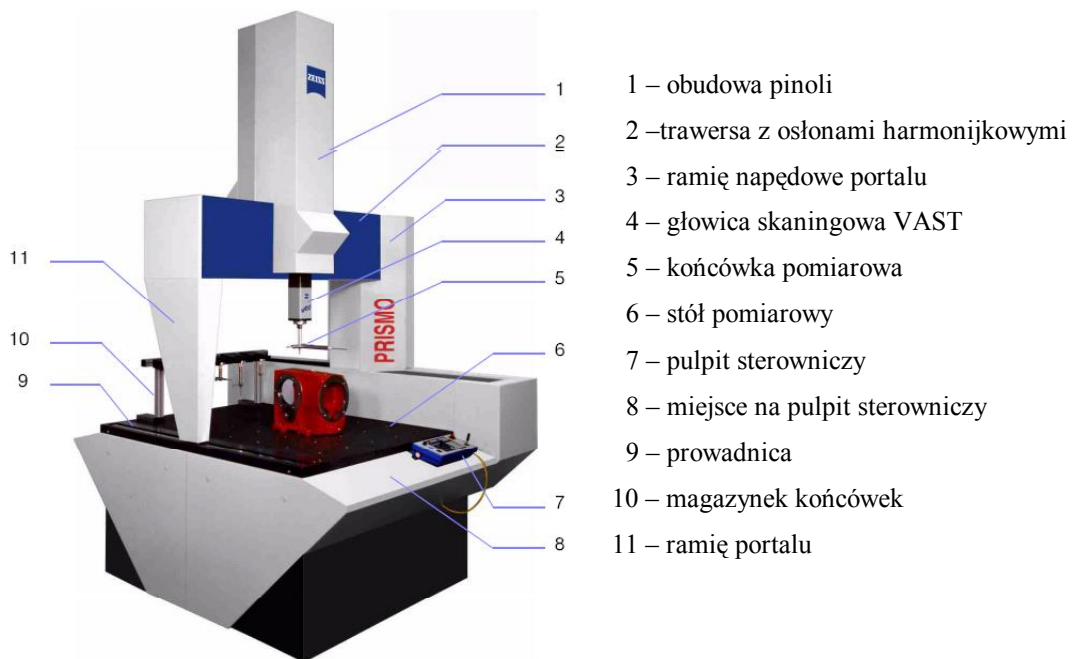
Rys. 3.2.1. Geometryczna interpretacja parametrów: a) okrągłości, b) okrągłości w sektorze kątowym

Sprawdzenie przez pomiar stanu wykonania elementów zakrzywionych, pozwala ocenić odchyłkę okrągłości przewodu osiowo-symetrycznego w przekroju poprzecznym (A-A i B-B), odchyłki okrągłości na łuku gięcia wewnętrznym R_w jak i zewnętrznym R_z oraz wyznaczyć średni promień gięcia (krzywizny) R (rys. 3.2.2).



Rys. 3.2.2. Rozmieszczenie przekrojów pomiarowych i punktów odniesienia w zagiętym łuku kolana o kącie gięcia 90°

Pomiary przeprowadzono korzystając z współrzędnościowej maszyny pomiarowej (WMP), typu PRISMO 7 firmy Zeiss (rys. 3.2.3), wyposażonej w głowicę skaningową. Sterowanie WMP odbywało się przez program komputerowy Calypso.



Rys.3.2.3. Współrzędnościowa maszyna pomiarowa typu PRISMO 7 firmy ZEISS [49]

Pomiary skaningowe pozwalają na uzyskanie dużej liczby punktów pomiarowych, a tym samym dostarczają znacznie więcej informacji o badanym elemencie. Wszystkie pomiary wykonano w warunkach przemysłowych, w stabilnych warunkach termicznych ($20 \pm 0,5^\circ\text{C}$), dla WMP przy dopuszczalnym błędzie granicznym pomiaru $\text{MPE}_e = 1,4 + \dot{L}/333$ [μm] (\dot{L} – mierzona długość [mm]). Pomiarom poddano dziewięć typoszeregów kolan wykonanych z rur ze stali nierdzewnej o różnym średnim promieniu gięcia R , jako elementy gięte układu instalacji zasilania paliwem lotniczych silników odrzutowych.

Z wykonanego typoszeregu kolan, cztery rodzaje wykonano z rury o nominalnej średnicy wewnętrznej $d = 11,2$ mm i grubości ścianki $g_n = 0,75$ mm, a pozostałe pięć z rury o nominalnej średnicy wewnętrznej $d = 14,25$ mm i grubości ścianki $g_n = 0,8$ mm. Badane kolana ułożono w zależności od wewnętrznej średnicy nominalnej giętej rury w dwa szeregi wg rosnącego średniego promienia gięcia R i oznaczono dla rury o mniejszej średnicy nominalnej jako: $K1$, $K2$, $K3$, $K4$, a dla rur o większej średnicy nominalnej jako: $K5$, $K6$, $K7$, $K8$, $K9$. Na rys. 3.1.2 przedstawiono schematycznie przekroje i miejsca pomiarowe mierzonych kolan, wyniki rzeczywistych pomiarów przedstawiono w tabelach.

Tabela 3.2.1. Wyznaczenie średniego promienia gięcia R kolan i odchyłek okrągłości dla łuków kolanowych w płaszczyźnie gięcia

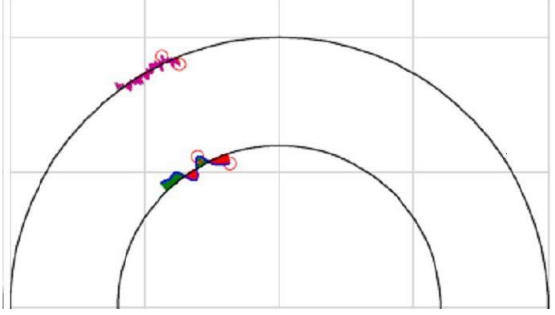
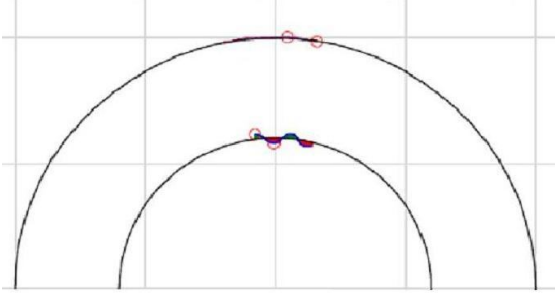
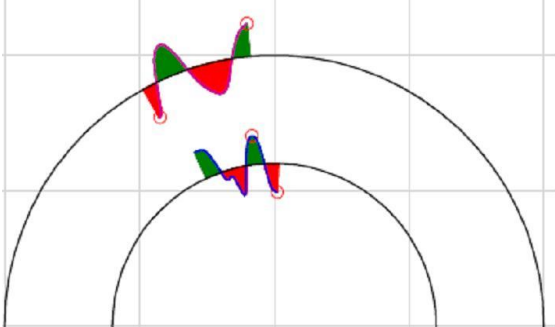
<p>K1</p>		<p>Kolano pomiarowe - <i>K1</i> $R_w = 13,2805$ mm $R_z = 24,8039$ mm $R = 19,0422$ mm Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,0064 mm Odchyłka okrągłości średnicy zewnętrznej ISO Okr. = 0,0048 mm skala – 500:1</p>
<p>K2</p>		<p>Kolano pomiarowe – <i>K2</i> $R_w = 19,5732$ mm $R_z = 31,9436$ mm $R = 25,7584$ mm Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,0036 mm Odchyłka okrągłości średnicy zewnętrznej ISO Okr. = 0,0005 mm skala – 500:1</p>
<p>K3</p>		<p>Kolano pomiarowe – <i>K3</i> $R_w = 33,5998$ mm $R_z = 45,5128$ mm $R = 39,5563$ mm Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,0095 mm Odchyłka okrągłości średnicy zewnętrznej ISO Okr. = 0,0108 mm skala – 1000:1</p>

Tabela 3.2.1. cd.

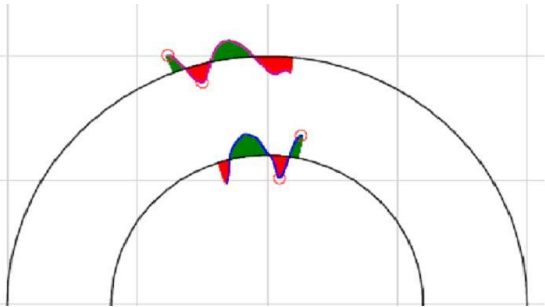
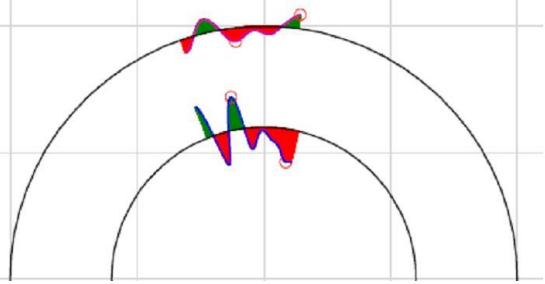
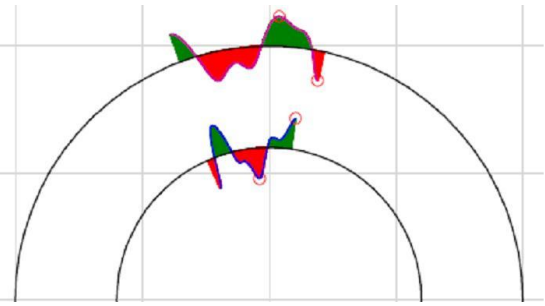
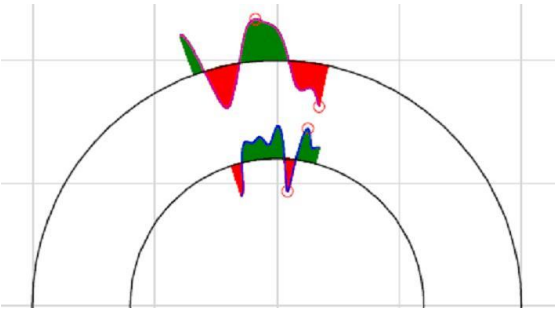
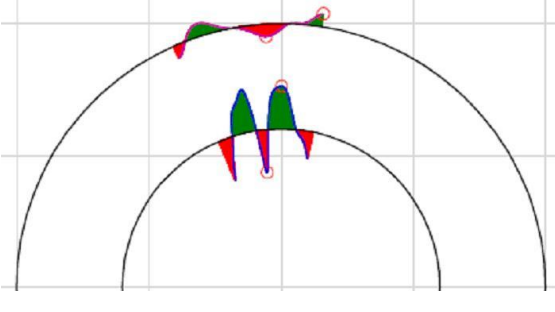
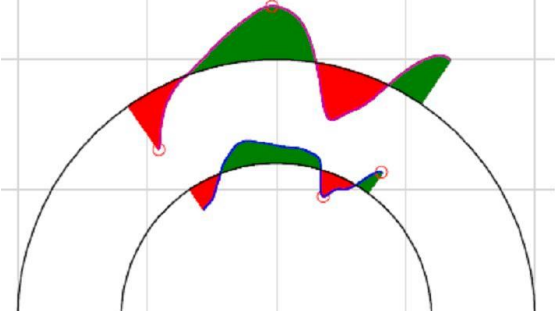
<p>K4</p>		<p>Kolano pomiarowe – K4 $R_w = 60,9645 \text{ mm}$ $R_z = 71,7710 \text{ mm}$ $R = 66,3677 \text{ mm}$ Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,0081 mm Odchyłka okrągłości średnicy zewnętrznej ISO Okr. = 0,0065 mm</p> <p>skala – 1000:1</p>
<p>K5</p>		<p>Kolano pomiarowe – K5 $R_w = 24,9410 \text{ mm}$ $R_z = 40,6948 \text{ mm}$ $R = 32,8179 \text{ mm}$ Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,0116 mm Odchyłka okrągłości średnicy zewnętrznej ISO Okr. = 0,0049 mm</p> <p>skala – 1000:1</p>
<p>K6</p>		<p>Kolano pomiarowe – K6 $R_w = 31,2409 \text{ mm}$ $R_z = 46,8069 \text{ mm}$ $R = 39,0239 \text{ mm}$ Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,0054 mm Odchyłka okrągłości średnicy zewnętrznej ISO Okr. = 0,0052 mm</p> <p>skala – 2000:1</p>

Tabela 3.2.1. cd.

<p>K7</p>		<p>Kolano pomiarowe – K7 $R_w = 34,6123 \text{ mm}$ $R_z = 49,7844 \text{ mm}$ $R = 42,1983 \text{ mm}$ Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,0029 mm Odchyłka okrągłości średnicy zewnętrznej ISO Okr. = 0,0038 mm skala – 4000:1</p>
<p>K8</p>		<p>Kolano pomiarowe – K8 $R_w = 73,6905 \text{ mm}$ $R_z = 89,9471 \text{ mm}$ $R = 81,8188 \text{ mm}$ Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,0269 mm Odchyłka okrągłości średnicy zewnętrznej ISO Okr. = 0,0087 mm skala – 500:1</p>
<p>K9</p>		<p>Kolano pomiarowe – K9 $R_w = 156,5035 \text{ mm}$ $R_z = 172,2039 \text{ mm}$ $R = 164,3537 \text{ mm}$ Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,0853 mm Odchyłka okrągłości średnicy zewnętrznej ISO Okr. = 0,1828 mm skala – 100:1</p>

W tabeli 3.2.1 przedstawiono wyniki z pomiarów dla wybranych łuków kolanowych (badanych kolan) w płaszczyźnie gięcia, dla których wyznaczono średnie promienie gięcia R oraz odchyłki okrągłości na zewnętrznym i wewnętrznym łuku zagiętego kolana.

W procesie sprężysto-plastycznym podczas gięcia łuków kolan występują naprężenia rozciągające na łuku zewnętrznym i ściskające na łuku wewnętrznym powodujące trwałe odkształcenia. Włókna materiału na łuku zewnętrznym ulegają wydłużeniu (rozciąganie) a na wewnętrznym łuku ulegają skróceniu (ściskanie). Odkształcenia włókien materiału są proporcjonalne do średniego promienia gięcia R i kąta zagięcia α (w naszym przypadku $\alpha = 90^\circ$). Bezwzględną różnicę długości Δl między włóknami na łuku zewnętrznym i wewnętrznym wyznaczono z równania [32]:

$$\Delta l = 0,01745 \alpha (R_z - R_w) \quad [\text{mm}] \quad (3.1)$$

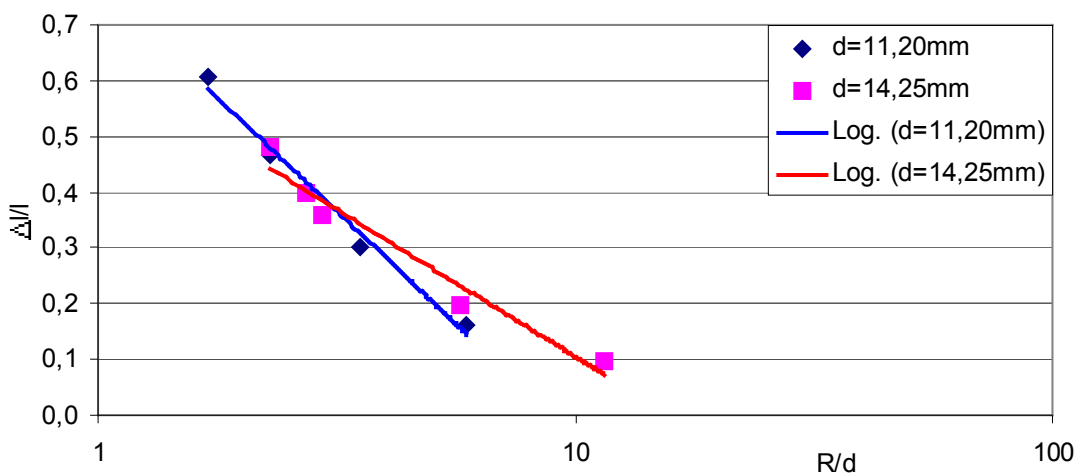
Długość łuku kolanowego l o kącie zagięcia $\alpha = 90^\circ$, na średnim promieniu gięcia R wyznaczono z równania:

$$l = \pi (R_z + R_w)/4 \quad [\text{mm}] \quad (3.2)$$

Korzystając z równań 3.1. i 3.2. wyznaczono względną różnicę długości $\Delta l/l$ między łukami zewnętrznym a wewnętrznym zagiętego kolana 90° z równania:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{4 \cdot 0,01745 \cdot 90^\circ \cdot (R_z - R_w)}{\pi \cdot (R_z + R_w)} \quad (3.3)$$

Dla badanych zagiętych kolan 90° obliczono względną różnicę długości $\Delta l/l$ między łukami: zewnętrznym a wewnętrznym dla średnic $d = 11,20$ mm i $d = 14,25$ mm. Otrzymane wyniki przedstawiono w postaci graficznej na wykresie (rys. 3.2.4) w funkcji względnego średniego promienia gięcia R/d .



Rys. 3.2.4. Zależność względnej różnicy długości między łukami $\Delta l/l = f(R/d)$

Tabela 3.2.2. Wyznaczenie wewnętrznej średnicy kolana i odchyłki okrągłości w przekroju A-A

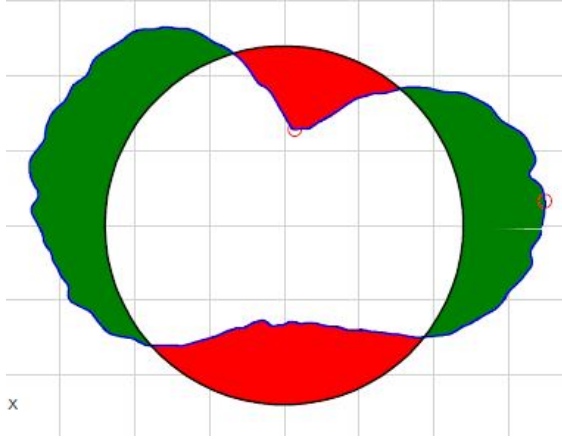
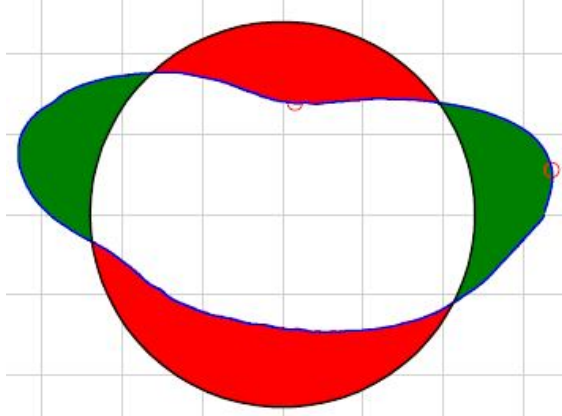
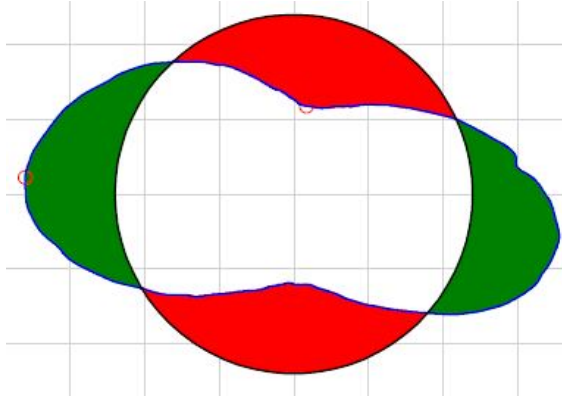
<p><i>K1</i></p>		<p>Kolano pomiarowe – <i>K1</i></p> <p>Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,0493 mm</p> <p>$d = 11,2060$ mm</p> <p>r – wew. $0^\circ = 5,5950$ mm r – wew. $90^\circ = 5,6258$ mm r – wew. $180^\circ = -5,5699$ mm r – wew. $270^\circ = -5,6215$ mm</p> <p>skala – 500:1</p>
<p><i>K2</i></p>		<p>Kolano pomiarowe – <i>K2</i></p> <p>Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,0540 mm</p> <p>$d = 11,1898$ mm</p> <p>r – wew. $0^\circ = 5,5781$ mm r – wew. $90^\circ = 5,6201$ mm r – wew. $180^\circ = -5,5749$ mm r – wew. $270^\circ = -5,6198$ mm</p> <p>skala – 500:1</p>
<p><i>K3</i></p>		<p>Kolano pomiarowe – <i>K3</i></p> <p>Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,0566 mm</p> <p>$d = 11,1874$ mm</p> <p>r – wew. $0^\circ = 5,5947$ mm r – wew. $90^\circ = 5,6475$ mm r – wew. $180^\circ = -5,5983$ mm r – wew. $270^\circ = -5,6414$ mm</p> <p>skala – 400:1</p>

Tabela 3.2.2. cd.

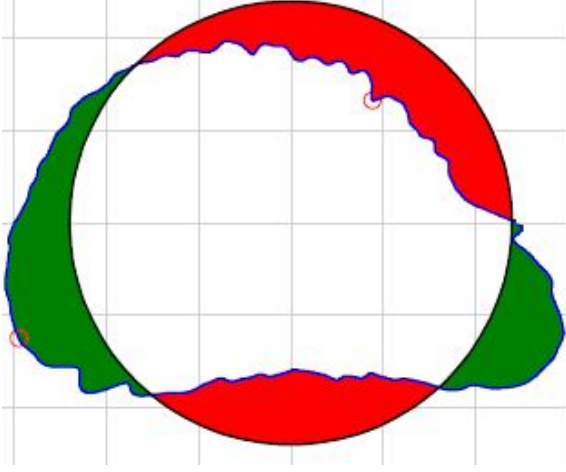
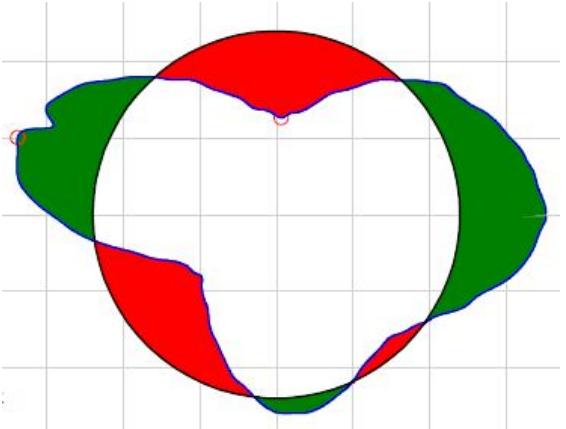
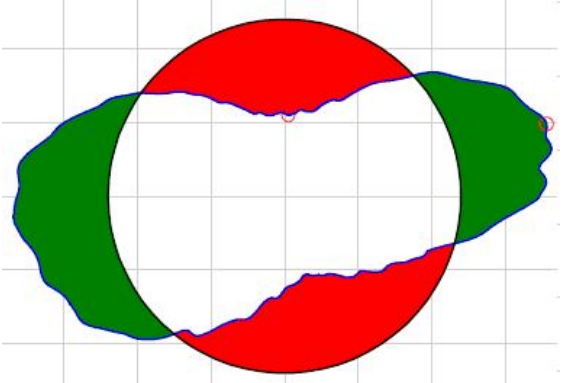
<p><i>K4</i></p>	 <p>A circularity deviation plot for K4. It shows a circular shape with a red outer boundary and a green inner boundary. The plot is overlaid on a grid. The red area is mostly at the top and bottom, while the green area is on the sides. There are small blue and red markers on the perimeter.</p>	<p>Kołano pomiarowe – <i>K4</i></p> <p>Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,0588 mm</p> <p>$d = 11,1866$ mm</p> <p>$r - \text{wew. } 0^\circ = 5,5816$ mm $r - \text{wew. } 90^\circ = 5,6112$ mm $r - \text{wew. } 180^\circ = -5,5751$ mm $r - \text{wew. } 270^\circ = -5,6263$ mm</p> <p>skala – 500:1</p>
<p><i>K5</i></p>	 <p>A circularity deviation plot for K5. It shows a circular shape with a red outer boundary and a green inner boundary. The plot is overlaid on a grid. The red area is mostly at the top and bottom, while the green area is on the sides. There are small blue and red markers on the perimeter.</p>	<p>Kołano pomiarowe – <i>K5</i></p> <p>Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,0638 mm</p> <p>$d = 14,2672$ mm</p> <p>$r - \text{wew. } 0^\circ = 7,1066$ mm $r - \text{wew. } 90^\circ = 7,1638$ mm $r - \text{wew. } 180^\circ = -7,1487$ mm $r - \text{wew. } 270^\circ = -7,1609$ mm</p> <p>skala – 300:1</p>
<p><i>K6</i></p>	 <p>A circularity deviation plot for K6. It shows a circular shape with a red outer boundary and a green inner boundary. The plot is overlaid on a grid. The red area is mostly at the top and bottom, while the green area is on the sides. There are small blue and red markers on the perimeter.</p>	<p>Kołano pomiarowe – <i>K6</i></p> <p>Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,0597 mm</p> <p>$d = 14,2682$ mm</p> <p>$r - \text{wew. } 0^\circ = 7,1306$ mm $r - \text{wew. } 90^\circ = 7,1529$ mm $r - \text{wew. } 180^\circ = -7,1328$ mm $r - \text{wew. } 270^\circ = -7,1835$ mm</p> <p>skala – 500:1</p>

Tabela 3.2.2. cd.

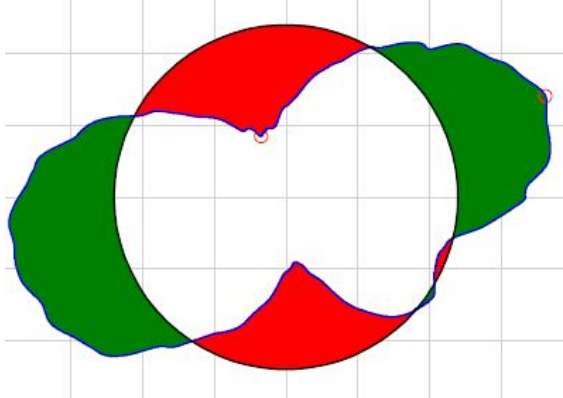
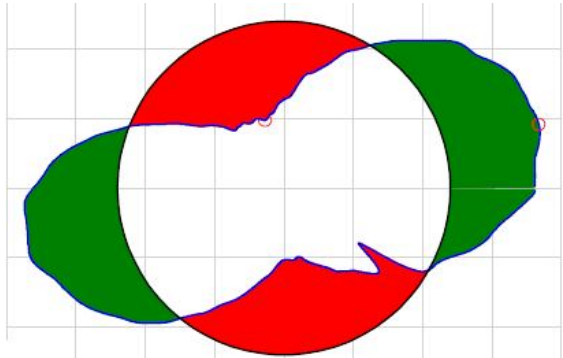
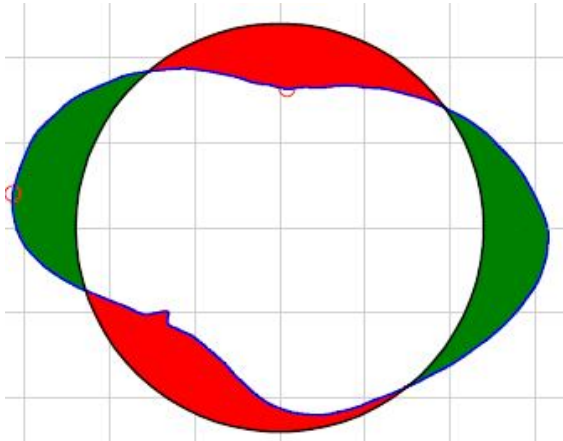
<p><i>K7</i></p>		<p>Kołano pomiarowe – <i>K7</i></p> <p>Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,0661 mm</p> <p>$d = 14,2688$ mm</p> <p>$r - \text{wew. } 0^\circ = 7,1066$ mm $r - \text{wew. } 90^\circ = 7,1476$ mm $r - \text{wew. } 180^\circ = -7,1092$ mm $r - \text{wew. } 270^\circ = -7,1713$ mm</p> <p>skala – 500:1</p>
<p><i>K8</i></p>		<p>Kołano pomiarowe – <i>K8</i></p> <p>Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,0647 mm</p> <p>$d = 14,2672$ mm</p> <p>$r - \text{wew. } 0^\circ = 7,1244$ mm $r - \text{wew. } 90^\circ = 7,1828$ mm $r - \text{wew. } 180^\circ = -7,1253$ mm $r - \text{wew. } 270^\circ = -7,1827$ mm</p> <p>skala – 500:1</p>
<p><i>K9</i></p>		<p>Kołano pomiarowe – <i>K9</i></p> <p>Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,0671 mm</p> <p>$d = 14,2678$ mm</p> <p>$r - \text{wew. } 0^\circ = 7,1284$ mm $r - \text{wew. } 90^\circ = 7,1838$ mm $r - \text{wew. } 180^\circ = -7,1351$ mm $r - \text{wew. } 270^\circ = -7,1889$ mm</p> <p>skala – 200:1</p>

Tabela 3.2.3. Wyznaczenie wewnętrznej średnicy kolana i odchyłki okrągłości w przekroju B-B

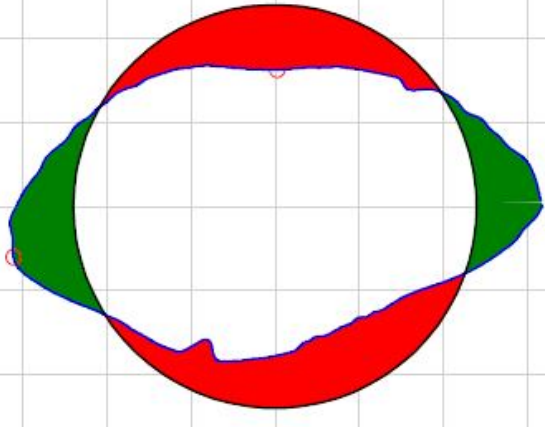
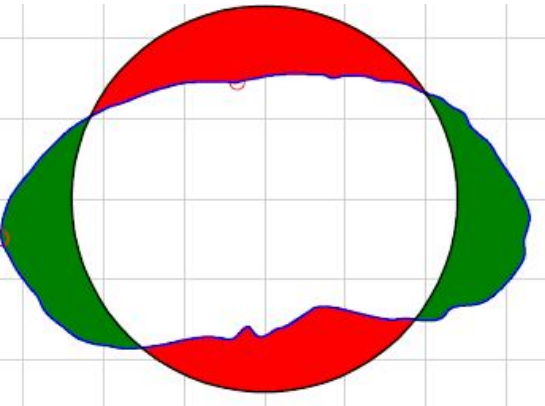
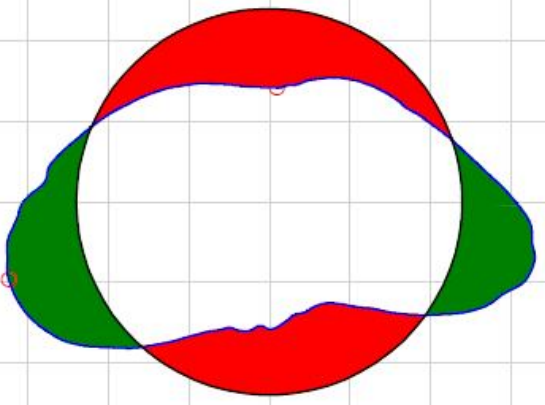
<p><i>K1</i></p>		<p>Kolano pomiarowe – <i>K1</i></p> <p>Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,3988 mm</p> <p>$d = 10,9950$ mm</p> <p>$r - \text{wew. } 0^\circ = 5,2965$ mm $r - \text{wew. } 90^\circ = 5,6910$ mm $r - \text{wew. } 180^\circ = -5,3847$ mm $r - \text{wew. } 270^\circ = -5,6646$ mm</p> <p>skala – 50:1</p>
<p><i>K2</i></p>		<p>Kolano pomiarowe – <i>K2</i></p> <p>Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,4049 mm</p> <p>$d = 10,9788$ mm</p> <p>$r - \text{wew. } 0^\circ = 5,3527$ mm $r - \text{wew. } 90^\circ = 5,7046$ mm $r - \text{wew. } 180^\circ = -5,3762$ mm $r - \text{wew. } 270^\circ = -5,6550$ mm</p> <p>skala – 50:1</p>
<p><i>K3</i></p>		<p>Kolano pomiarowe – <i>K3</i></p> <p>Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,4061 mm</p> <p>$d = 10,9756$ mm</p> <p>$r - \text{wew. } 0^\circ = 5,3146$ mm $r - \text{wew. } 90^\circ = 5,6749$ mm $r - \text{wew. } 180^\circ = -5,3143$ mm $r - \text{wew. } 270^\circ = -5,6459$ mm</p> <p>skala – 50:1</p>

Tabela 3.2.3. cd.

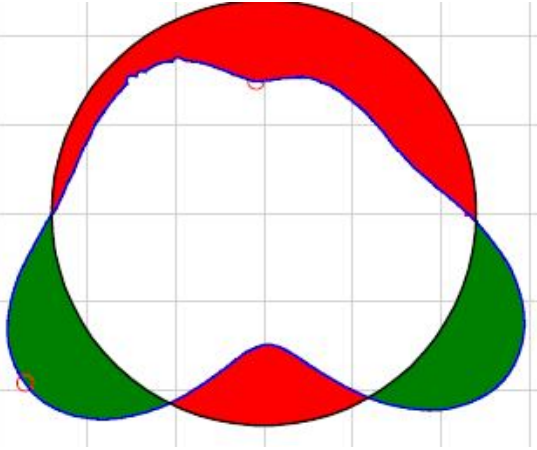
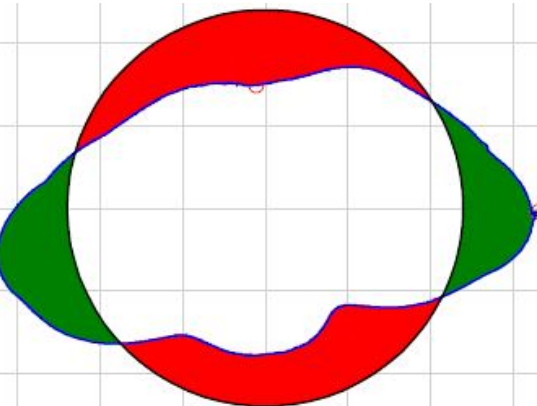
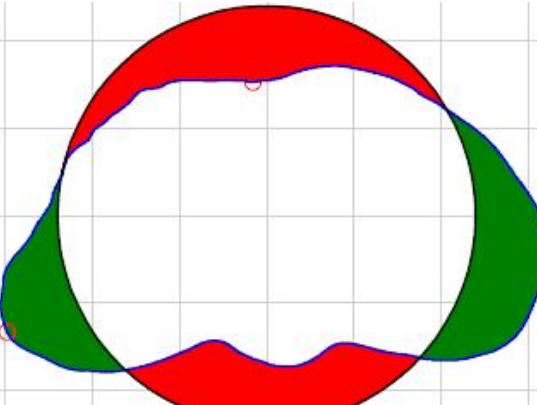
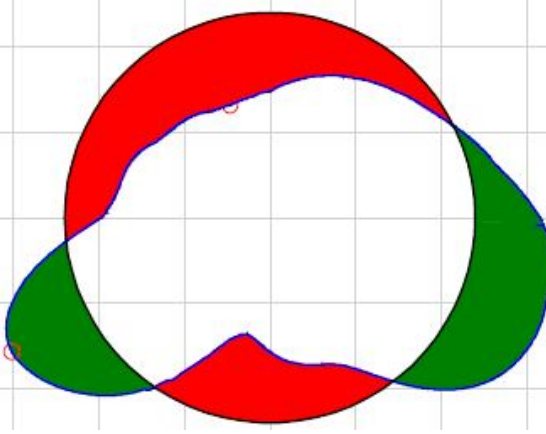
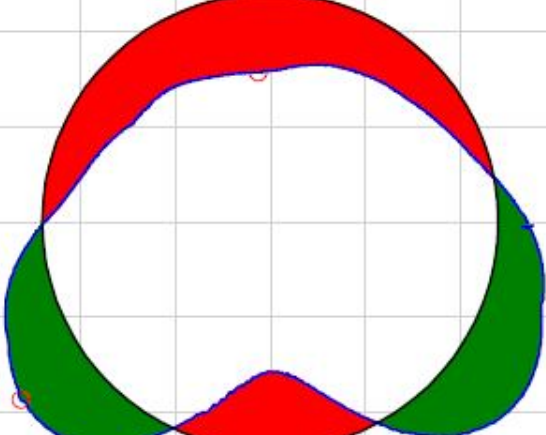
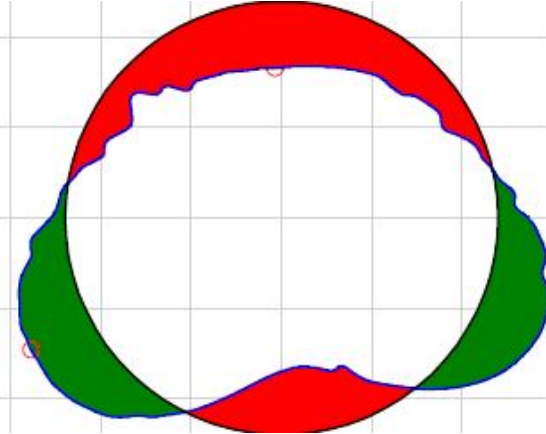
<p><i>K4</i></p>		<p>Kolano pomiarowe – <i>K4</i></p> <p>Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,3992 mm</p> <p>$d = 10,9874$ mm</p> <p>$r - \text{wew. } 0^\circ = 5,3806$ mm $r - \text{wew. } 90^\circ = 5,5428$ mm $r - \text{wew. } 180^\circ = -5,3852$ mm $r - \text{wew. } 270^\circ = -5,5471$ mm</p> <p>skala – 50:1</p>
<p><i>K5</i></p>		<p>Kolano pomiarowe – <i>K5</i></p> <p>Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,4159 mm</p> <p>$d = 14,0240$ mm</p> <p>$r - \text{wew. } 0^\circ = 6,8657$ mm $r - \text{wew. } 90^\circ = 7,2794$ mm $r - \text{wew. } 180^\circ = -6,8962$ mm $r - \text{wew. } 270^\circ = -7,1792$ mm</p> <p>skala – 50:1</p>
<p><i>K6</i></p>		<p>Kolano pomiarowe – <i>K6</i></p> <p>Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,4021 mm</p> <p>$d = 14,0262$ mm</p> <p>$r - \text{wew. } 0^\circ = 6,8564$ mm $r - \text{wew. } 90^\circ = 7,1997$ mm $r - \text{wew. } 180^\circ = -6,8840$ mm $r - \text{wew. } 270^\circ = -7,1178$ mm</p> <p>skala – 50:1</p>

Tabela 3.2.3. cd.

<p><i>K7</i></p>		<p>Kolano pomiarowe – <i>K7</i></p> <p>Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,4067 mm</p> <p>$d = 14,0240$ mm</p> <p>$r - \text{wew. } 0^\circ = 6,8715$ mm $r - \text{wew. } 90^\circ = 7,1286$ mm $r - \text{wew. } 180^\circ = -6,8445$ mm $r - \text{wew. } 270^\circ = -6,9871$ mm</p> <p>skala – 50:1</p>
<p><i>K8</i></p>		<p>Kolano pomiarowe – <i>K8</i></p> <p>Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,3824 mm</p> <p>$d = 14,0290$ mm</p> <p>$r - \text{wew. } 0^\circ = 6,8965$ mm $r - \text{wew. } 90^\circ = 7,1258$ mm $r - \text{wew. } 180^\circ = -6,8931$ mm $r - \text{wew. } 270^\circ = -7,0961$ mm</p> <p>skala – 50:1</p>
<p><i>K9</i></p>		<p>Kolano pomiarowe – <i>K9</i></p> <p>Odchyłka okrągłości średnicy wewnętrznej ISO Okr. = 0,3684 mm</p> <p>$d = 14,0294$ mm</p> <p>$r - \text{wew. } 0^\circ = 6,9346$ mm $r - \text{wew. } 90^\circ = 7,2222$ mm $r - \text{wew. } 180^\circ = -6,9378$ mm $r - \text{wew. } 270^\circ = -7,1718$ mm</p> <p>skala – 50:1</p>

Z wykresu przedstawionego na rys. 3.2.4 w układzie pół-logarytmicznym wynika, że względna różnica długości między łukami: zewnętrznym a wewnętrznym $\Delta l/l$ ze wzrostem względnego średniego promienia gięcia R/d maleje szybciej dla mniejszej, niż dla większej średnicy rury d .

W tabeli 3.2.2 przedstawiono wyniki z pomiarów geometrii badanych kolan w płaszczyźnie prostopadłej do osi symetrii rurociągu (przekrój A-A). Wyznaczono rzeczywistą średnicę wewnętrzną przekroju kołowego w przekroju A-A (rys.3.2.2) wraz z odchyłkami okrągłości w tym przekroju.

W tabeli 3.2.3 przedstawiono wyniki z pomiarów badanych kolan w przekroju B-B leżącym na dwusiecznej kąta gięcia kolana w płaszczyźnie prostopadłej do osi symetrii kanału. Wykonując pomiary wyznaczono rzeczywistą średnicę wewnętrzną zagiętego kanału osiowosymetrycznego w przekroju B-B wraz z odchyłkami okrągłości występującymi w tym przekroju.

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że zagięte łuki kolanowe charakteryzuje zmiana w kształcie przekroju poprzecznego wewnątrz rury. Występują pocienienia ścianki na łuku zewnętrznym (wywołane rozciąganiem) i pogrubienia ścianki na łuku wewnętrznym (wywołane ściskaniem). Zjawisku związanemu ze zmianami kształtu i przekroju rury towarzyszy tzw. owalizacja przekroju poprzecznego rury, która decyduje o jakości i przydatności zagiętych kolan, pracujących szczególnie pod wysokim ciśnieniem. Owalizację e przekroju poprzecznego rury obliczamy z równania [32]:

$$e = \frac{D_a - D_b}{D_{zew}} \cdot 100\% \quad (3.4)$$

gdzie:

D_a – duża oś elipsy [mm]

D_b – mała oś elipsy [mm]

D_{zew} - średnica zewnętrzna rury [mm]

Biorąc pod uwagę że przy przepływie najważniejsza jest średnica wewnętrzna i jej geometria osiowosymetryczna, na podstawie równania (3.4) wprowadzono tzw. owalizację wewnętrzną e_w . Charakteryzuje ona wewnętrzną średnicę przekroju poprzecznego rury zniekształconą w czasie gięcia. Zaproponowano do jej obliczeń następujące równanie:

$$e_w = \frac{d_{aw} - d_{bw}}{d} \cdot 100\% \quad (3.5)$$

gdzie:

d_{aw} - duża oś elipsy wewnętrznej [mm]

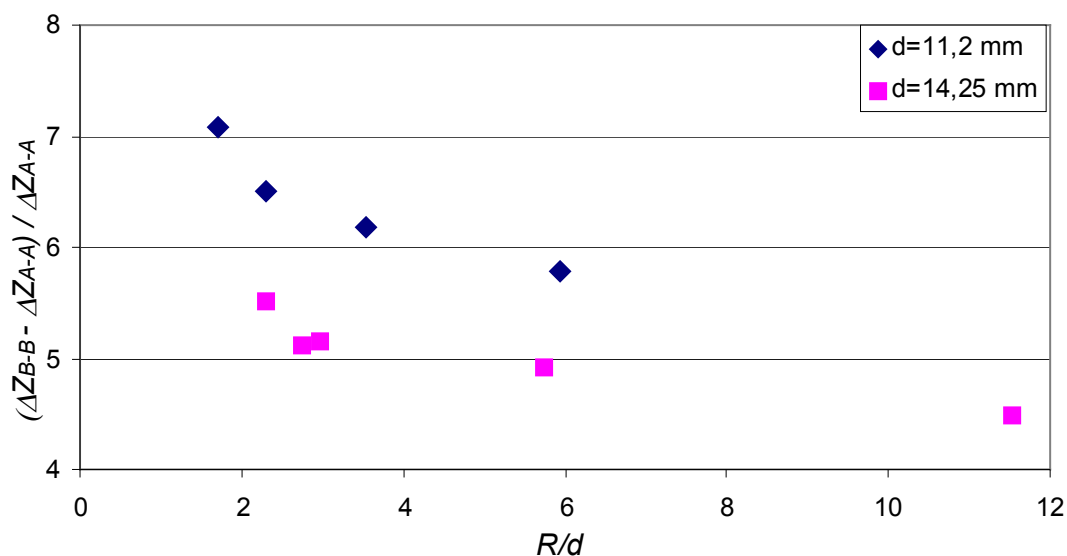
d_{bw} - mała oś elipsy wewnętrznej [mm]

Z przeprowadzonych pomiarów można określić jedynie owalizację wewnętrzną e_w dla kolan $K1$, $K2$, $K3$, w przekroju A-A i B-B. Tylko w tych przypadkach osie elips pokrywają się z dużym przybliżeniem z osiami symetrii przekroju poprzecznego w których dokonywano pomiary. Wyniki z obliczeń procentowej owalizacji wewnętrznej w przekroju A-A i B-B, oraz względnej owalizacji wewnętrznej w przekroju B-B do przekroju A-A przedstawiono w tabeli 3.2.4.

Tabela 3.2.4. Owalizacja wybranych kolan w przekrojach A-A i B-B

Kolano	R/d [mm]	$e_{w(A-A)}$ [%]	$e_{w(B-B)}$ [%]	$e_{w(B-B)} / e_{w(A-A)}$
$K1$	1,70	0,74	6,13	8,34
$K2$	2,30	0,78	5,74	7,40
$K3$	3,53	0,92	6,30	6,85

Porównano również odchyłki okrągłości ΔZ badanych łuków kolanowych dla średnicy nominalnej $d = 11,2$ mm i $d = 14,25$ mm w przekrojach B-B i A-A. Względny przyrost odchyłki okrągłości $(\Delta Z_{B-B} - \Delta Z_{A-A}) / \Delta Z_{A-A}$ w zależności od względnego średniego promienia gięcia R/d przedstawiono w postaci wykresu na rys. 3.2.5.

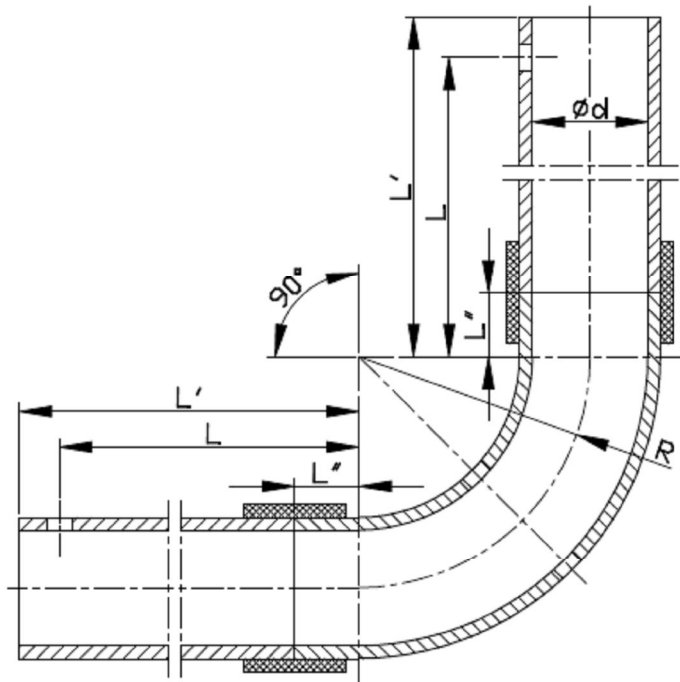


Rys. 3.2.5. Zależność względnego przyrostu odchyłki okrągłości $(\Delta Z_{B-B} - \Delta Z_{A-A}) / \Delta Z_{A-A}$ w funkcji względnego średniego promienia gięcia R/d

Z wykresu przedstawionego na rys. 3.2.5 wynika, że ze wzrostem względnego średniego promienia gięcia R/d występujący względny przyrost odchyłki okrągłości $(\Delta Z_{B-B} - \Delta Z_{A-A}) / \Delta Z_{A-A}$ maleje niezależnie od wielkości średnicy nominalnej rury. Dla przebadanych kolan przepływomierzy krzywakowych wykonanych z rur o średnicy wewnętrznej $d = 11,2$ mm względny przyrost odchyłki okrągłości zawiera się w granicach $6,5 \pm 0,8$ a dla rur o średnicy $d = 14,25$ mm w granicach $5,0 \pm 0,6$.

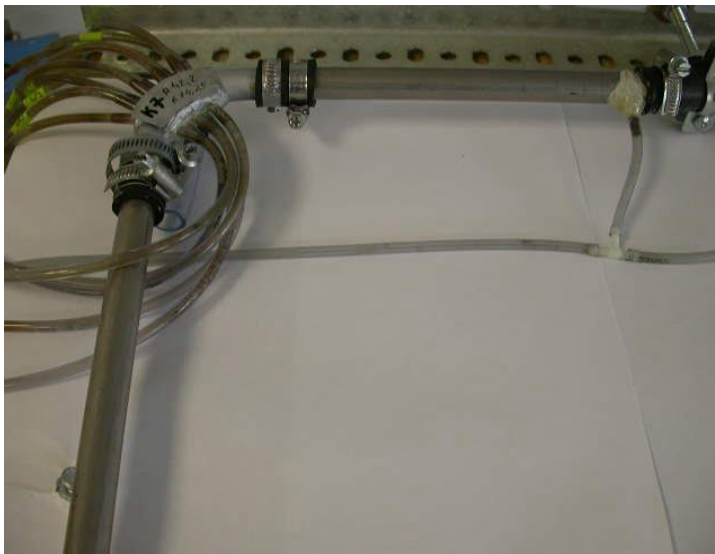
3.3. Przepływomierze kolanowe

Badane przepływomierze kolanowe zbudowano z dwóch prostych kanałów osiowosymetrycznych (wlotowy i wylotowy) o długościach L' i znajdującego się między nimi łuku kolana (kolano pomiarowe) o kącie gięcia 90° wg rys. 3.3.1.



Rys. 3.3.1. Budowa przepływomierza kolanowego

Na rys. 3.3.2. pokazano widok elementów przepływomierza połączonych między sobą czołowo za pomocą łączników gumowo-tkaninowych i opasek.



Rys. 3.3.2. Widok przepływomierza kolanowego

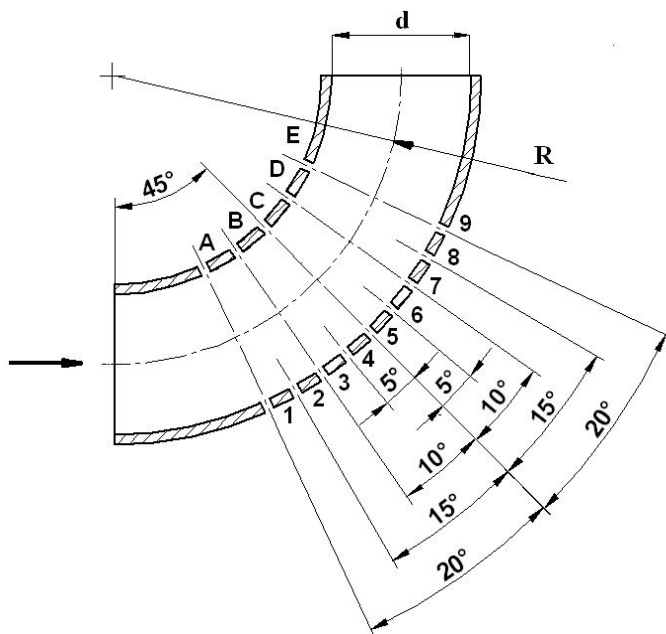
W tabeli 3.3.1. przedstawiono parametry geometryczne badanych kolan pomiarowych gdzie podano: średnicę nominalną d , średni promień gięcia R i względny średni promień gięcia R/d .

Tabela 3.3.1. Parametry geometryczne badanych kolan

Lp.	Oznaczenie badanego kolana	Średni promień gięcia kolana R [mm]	Wewnętrzna średnica kanału kolana d [mm]	Względny średni promień gięcia R/d
1.	$K1$	19,04	11,20	1,70
2.	$K2$	25,76	11,20	2,30
3.	$K3$	39,56	11,20	3,53
4.	$K4$	66,37	11,20	5,93
5.	$K5$	32,82	14,25	2,30
6.	$K6$	39,02	14,25	2,74
7.	$K7$	42,20	14,25	2,96
8.	$K8$	81,82	14,25	5,74
9.	$K9$	164,35	14,25	11,53

Proste kanały przed i za kolanem pomiarowym służą do stabilizacji zaburzonej strugi cieczy na wlocie do badanego przepływomierza i za nim. Dla przepływomierzy spiętrzających zwężkowych przyjmuje się, że długość prostego kanału przed elementem pomiarowym powinna wynosić od 5÷80 średnic wewnętrznych d , a za nim 5 średnic d [26]. Prosty kanał osiowosymetryczny dla przepływomierzy kolanowych nie powinien być krótszy niż ok. 10 średnic wewnętrznych d [43]. Dla kolan pomiarowych $K1÷K4$ giętych z rur o średnicy wewnętrznej $d = 11,20$ mm, długości prostych kanałów: wlotowego i wylotowego wynosiły odpowiednio po $L' = 175$ mm ($L' = 15,8 \cdot d$), gdzie $L = 150$ mm, a $L'' = 20$ mm. Dla kolan pomiarowych $K5÷K9$ giętych z rur o średnicy wewnętrznej $d = 14,25$ mm, długości prostych kanałów osiowosymetrycznych: wlotowego i wylotowego wynosiły odpowiednio po $L' = 225$ mm ($L' = 15,6 \cdot d$) gdzie $L = 200$ mm, a $L'' = 25$ mm. W odległościach L od końca i początku zagięcia kolana, wykonano otwory impulsowe o średnicy wewnętrznej $d_i = 1,5$ mm do pomiaru różnicy ciśnień statycznych na badanym przepływomierzu celem wyznaczenia strat ciśnienia między punktami pomiarowymi na wlocie i wylocie badanego przepływomierza. Pozwala to na wyznaczenie zastępczych współczynników strat miejscowych badanych przepływomierzy.

Na rys. 3.3.3 przedstawiono rozmieszczenie otworów poboru ciśnienia (wejścia do rurek impulsowych) dla badanych kolan z zaznaczonym kierunkiem przepływu strumienia cieczy. Przy przepływie strumienia cieczy przez kolano, w płynącej strudze zmieniają się wartości ciśnienia statycznego na wewnętrznym i zewnętrznym łuku kolana, jak i wartości prędkości w różnych miejscach kolana. Na łuku wewnętrznym wykonano pięć otworów poboru ciśnienia o średnicy wewnętrznej $\varnothing 1,5$ mm co 10° kątowych, oznaczając je dużymi literami *A*, *B*, *C*, *D*, *E* zgodnie z kierunkiem przepływu cieczy. Przyjęto, że punkt *C* leży na dwusiecznej kąta gięcia łuku kolana. Natomiast na łuku zewnętrznym wykonano dziewięć otworów poboru ciśnienia o średnicy wewnętrznej $\varnothing 1,5$ mm co 5° kątowych, oznaczając je cyframi od 1 do 9 zgodnie z kierunkiem przepływu cieczy przyjmując, że punkt 5 leży na dwusiecznej kąta gięcia łuku kolana (rys. 3.3.3).



Rys. 3.3.3. Rozmieszczenie otworów poboru ciśnienia

Takie rozmieszczenie punktów poboru ciśnienia pozwalało na doświadczalne wyznaczanie rozkładu ciśnienia spiętrzenia pomiędzy punktami w badanym kolanie, wzdłuż strugi przepływającej cieczy. W pracy przyjęto następujący sposób oznaczeń: np. *K6 B-5*, gdzie przez *K6* oznaczono badane kolano pomiarowe z poborem ciśnienia w punkcie *B* na łuku wewnętrznym i punkcie 5 na łuku zewnętrznym. Na rys. 3.3.4 przedstawiono przykładowy widok badanego kolana *K8* z wywierconymi o średnicy $\varnothing 1,5$ mm otworami poboru ciśnienia na zewnętrznym i wewnętrznym łuku zgodnie z rys. 3.3.3.



Rys. 3.3.4. Kolano *K8* z wywierconymi otworami poboru ciśnienia na łuku zewnętrznym i wewnętrznym

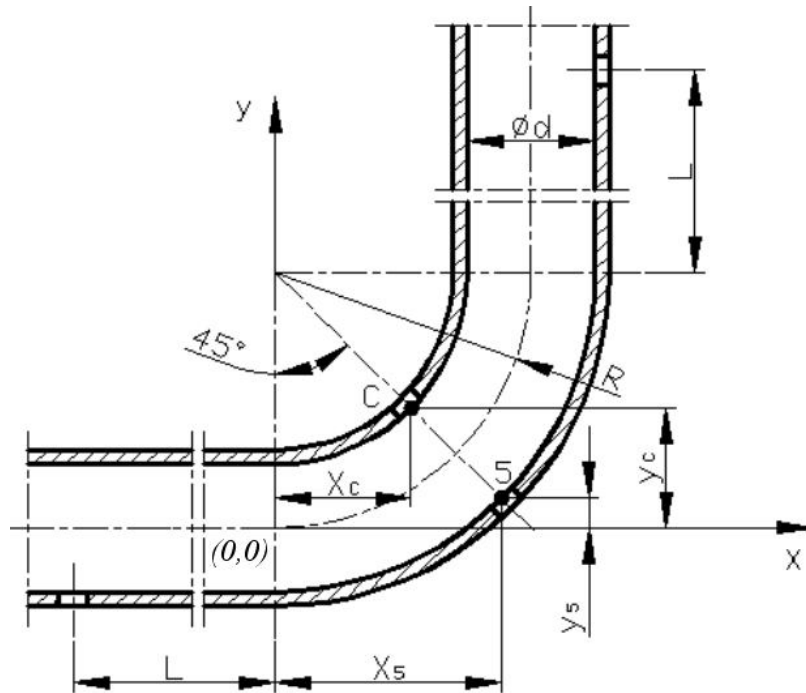
Na rys. 3.3.5 przedstawiono przykładowy widok kompletnego kolana pomiarowego *K8* do pomiaru rozkładu ciśnienia spiętrzenia wzdłuż strumienia przepływającej cieczy. Widoczne są króćce do poboru ciśnienia statycznego wraz z elastycznymi rurkami impulsowymi doprowadzającymi sygnały ciśnienia do przetwornika różnicy ciśnień.



Rys. 3.3.5. Kompletnie kolano do pomiaru rozkładu spiętrzenia ciśnienia

W praktyce przemysłowej przyjęto zasadę, że otwory impulsowe poboru ciśnienia umieszcza się na dwusiecznej kąta gięcia kolana pomiarowego [51, 72]. Na rys. 3.3.6 przedstawiono przyjęte do obliczeń numerycznych, rozmieszczenie punktów poboru ciśnienia spiętrzenia, leżące na dwusiecznej kąta zagięcia kolana w punktach C-5. Natomiast w tabeli 3.3.2 przedstawiono parametry geometryczne badanych kolan *K1...K9* i odpowiadające im współrzędne punktów C-5 poboru ciśnienia, leżące na dwusiecznej kąta zagięcia, przyjęte do obliczeń symulacji numerycznych. Współrzędne początkowe (0, 0) układu współrzędnych znajdują na przecięciu osi *xy*, gdzie oś *x* jest

osią symetrii wlotowego kanału osiowosymetrycznego kolana, a oś y prostopadłą do początku zagięcie kolana.



Rys..3.3.5. Rozmieszczenie przyjętych do obliczeń numerycznych punktów C-5 poboru ciśnienia

Tabela 3.3.2. Parametry geometryczne badanych kolan przyjęte do obliczeń symulacji numerycznych.

Badane kolano	Średni promień gięcia kolana R [mm]	Średnica nominalna kanału kolana d [mm]	Względny średni promień gięcia R/d	Współrzędne punktów poboru ciśnienia w kolanie, leżące na dwusiecznej łuku gięcia, przyjęte do symulacji numerycznej			
				C		5	
				x_c [mm]	y_c [mm]	x_5 [mm]	y_5 [mm]
K1	19,04	11,20	1,70	9,51	9,50	17,42	1,65
<i>K2</i>	25,76	11,20	2,30	14,26	11,50	22,17	3,60
<i>K3</i>	39,56	11,20	3,53	24,02	15,50	31,93	7,65
<i>K4</i>	66,37	11,20	5,93	42,98	23,35	50,88	15,50
<i>K5</i>	32,82	14,25	2,30	18,18	14,60	28,24	4,60
<i>K6</i>	39,02	14,25	2,74	22,56	16,40	32,62	6,40
<i>K7</i>	42,20	14,25	2,96	24,81	17,35	34,87	7,35
<i>K8</i>	81,82	14,25	5,74	52,83	28,95	62,88	18,95
<i>K9</i>	164,35	14,25	11,53	111,18	53,15	121,24	43,10

3.4. Wyznaczenie charakterystyk przepływowych badanych kolan

W trakcie badań wyznaczono charakterystyki przepływowe $q_m = f(\Delta p)$ badanych kolan K1 do K9 wykorzystując stanowisko badawcze pomiarowo-rejestrujące, którego schemat przedstawiono na rys. 3.1.3, z grawitacyjnym wymuszeniem przepływu wody przez układ pomiarowy (tzw. wymuszenie hydrostatyczne) i/lub za pomocą pompy wirowej. Wyznaczono po 10 charakterystyk indywidualnych dla każdego z badanych kolan przy wymuszeniu grawitacyjnym i za pomocą pompy wirowej. Pomiary wykonywano dla zakresu spięrzeń od ok. 0,5 kPa (dla kolana K9) do ok. 4 kPa (dla kolana K1) dla wody o temperaturze $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}$.

Rezultaty badań doświadczalnych w postaci wykresów przykładowych charakterystyk przepływowych przedstawiono od rys. 3.4.1 do rys. 3.4.9. Wykresy przedstawiają zależność strumienia objętości w funkcji spięzienia ciśnienia $q_v = f(\Delta p)$, zmierzonego na dwusiecznej kąta gięcia kolana w punktach jego pomiaru tj. C-5. Na poszczególnych wykresach przedstawiono, w postaci punktów, wyniki z rzeczywistych pomiarów przepływu. Natomiast wartości wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów dla równania typu: $q_v = a \cdot \Delta p^w$ dla obu wymuszeń przepływu, przedstawiono w postaci linii. Punkty w kolorze niebieskim przedstawiają wymuszenia przepływu za pomocą pompy wirowej, a w kolorze czerwonym wymuszenie grawitacyjne (hydrostatyczne). Przy wyznaczaniu tych modeli obliczeniowych ważne było, by zmienne w nich użyte były statystycznie istotne, czyli takie, w których występuje zależność między zmiennymi polegająca na tym, że wraz ze wzrostem jednej zmiennej rosną średnie wartości drugiej. Dobierając ww. modele obliczeniowe wyznaczono współczynniki dopasowania r^2 , które informują o tym, w jakim stopniu parametry przyjętego modelu są dopasowane do rzeczywistych danych pomiarowych. Współczynnik dopasowania, zwany również współczynnikiem determinacji r^2 , jest kwadratem współczynnika korelacji [31, 36, 60], obliczanym z równania:

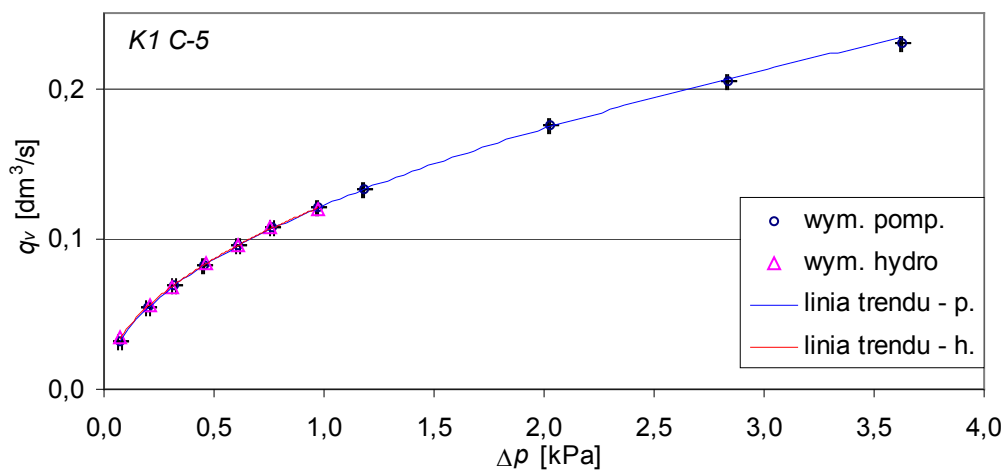
$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i' - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.6)$$

gdzie:

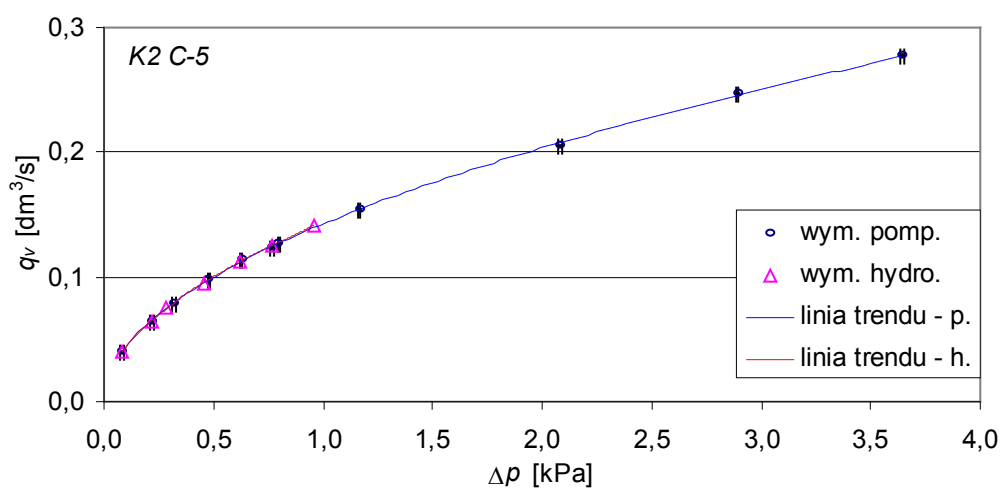
y_i' – i-ta prognoza (wielkość wyznaczona na podstawie modelu obliczeniowego)

y_i - i-ty wynik pomiaru

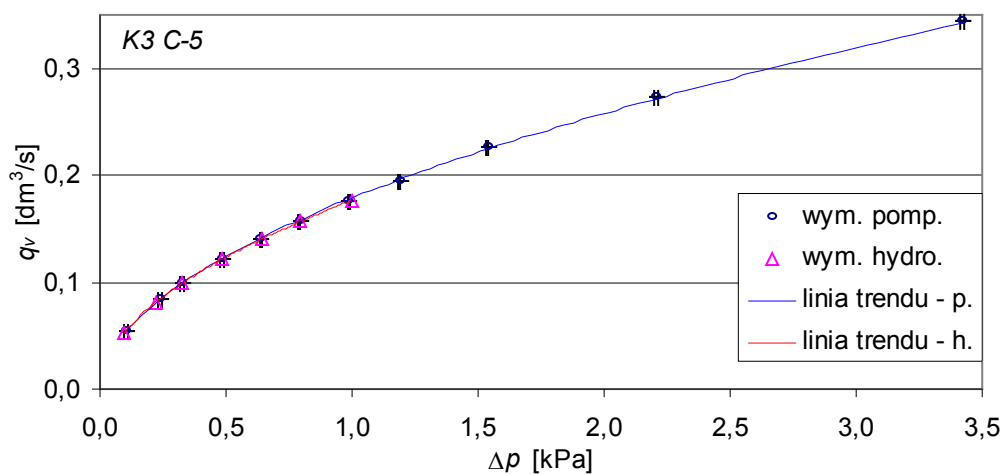
\bar{y} - wartość średnia y



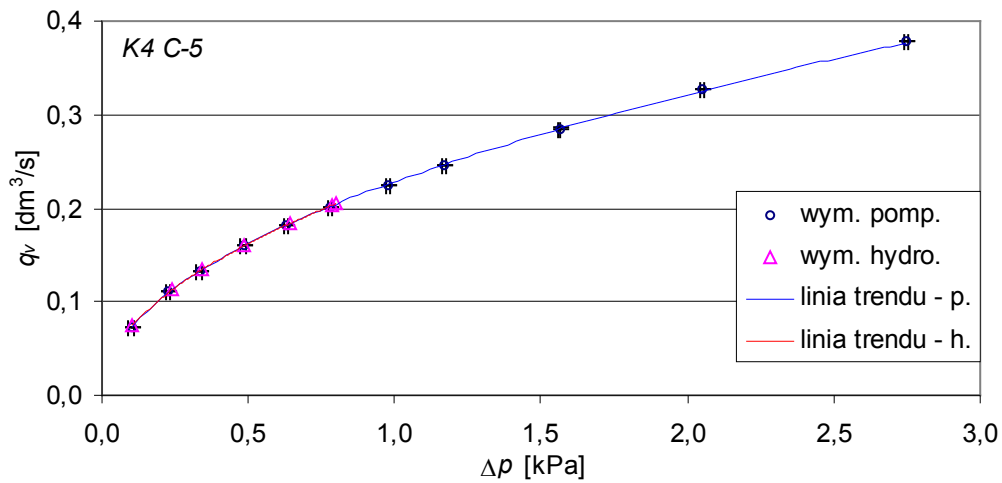
Rys. 3.4.1. Strumień objętości w funkcji ciśnienia spiętrzenia $q_v=f(\Delta p)$ między punktami C-5 dla kolana K1 dla różnych wymuszeń



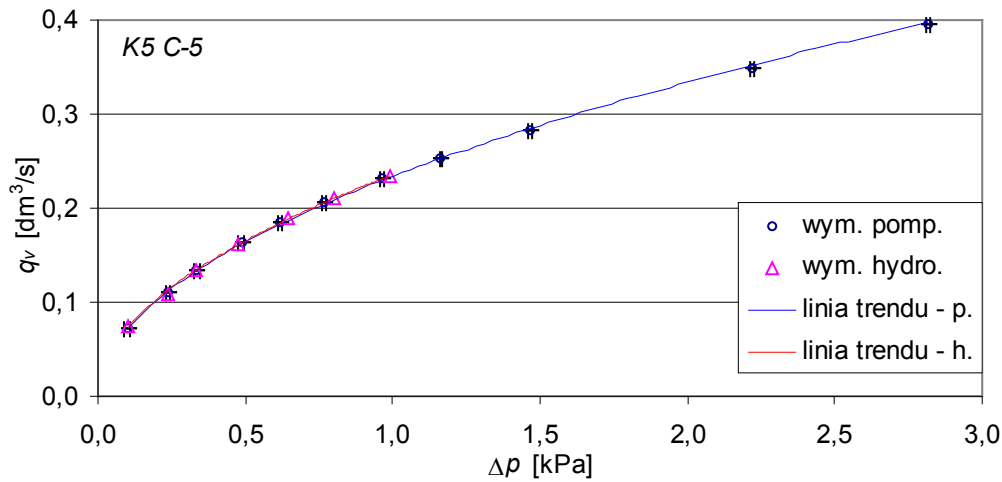
Rys. 3.4.2. Strumień objętości w funkcji ciśnienia spiętrzenia $q_v=f(\Delta p)$ między punktami C-5 dla kolana K2 dla różnych wymuszeń



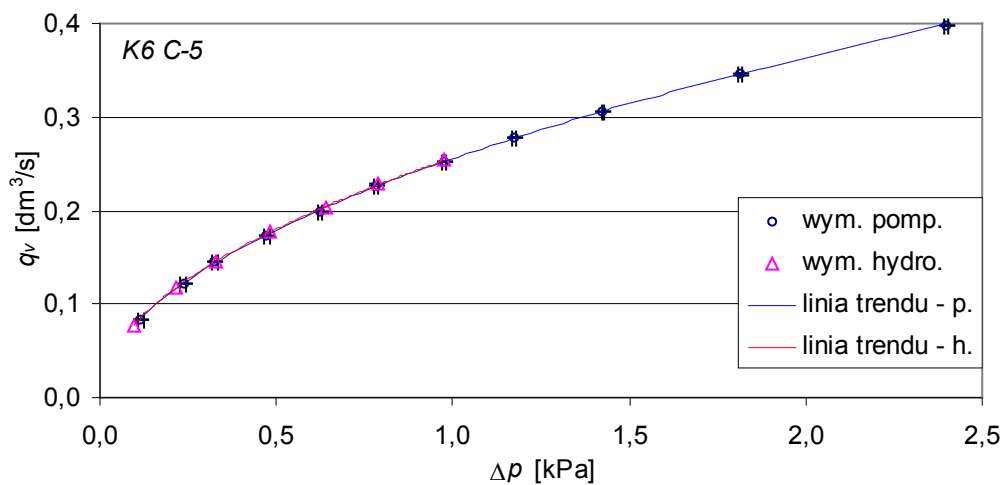
Rys. 3.4.3. Strumień objętości w funkcji ciśnienia spiętrzenia $q_v=f(\Delta p)$ między punktami C-5 dla kolana K3 dla różnych wymuszeń



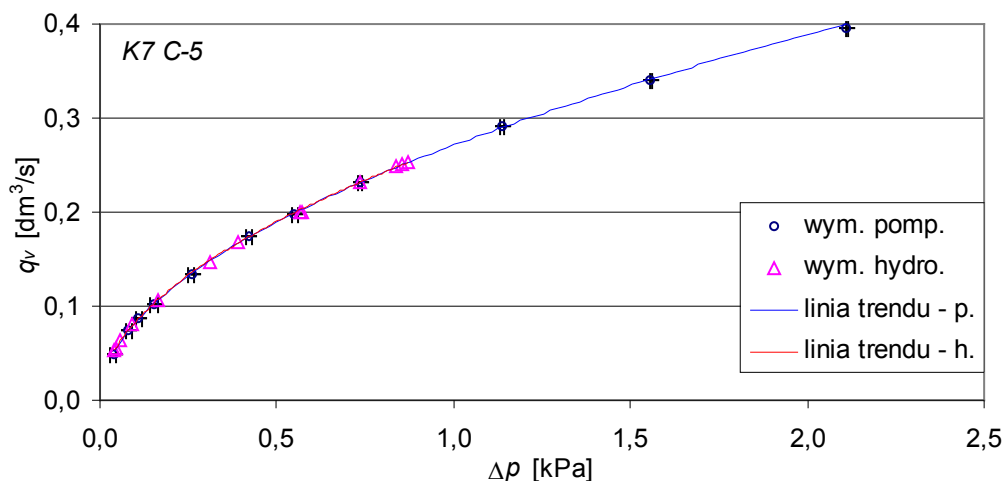
Rys. 3.4.4. Strumień objętości w funkcji ciśnienia spiętrzenia $q_v=f(\Delta p)$ między punktami C-5 dla kolana K4 dla różnych wymuszeń



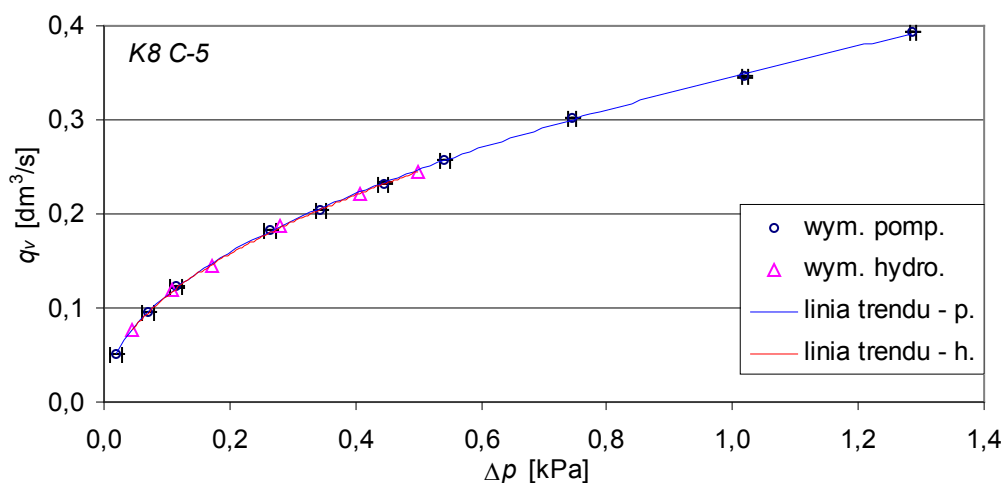
Rys. 3.4.5. Strumień objętości w funkcji ciśnienia spiętrzenia $q_v=f(\Delta p)$ między punktami C-5 dla kolana K5 dla różnych wymuszeń



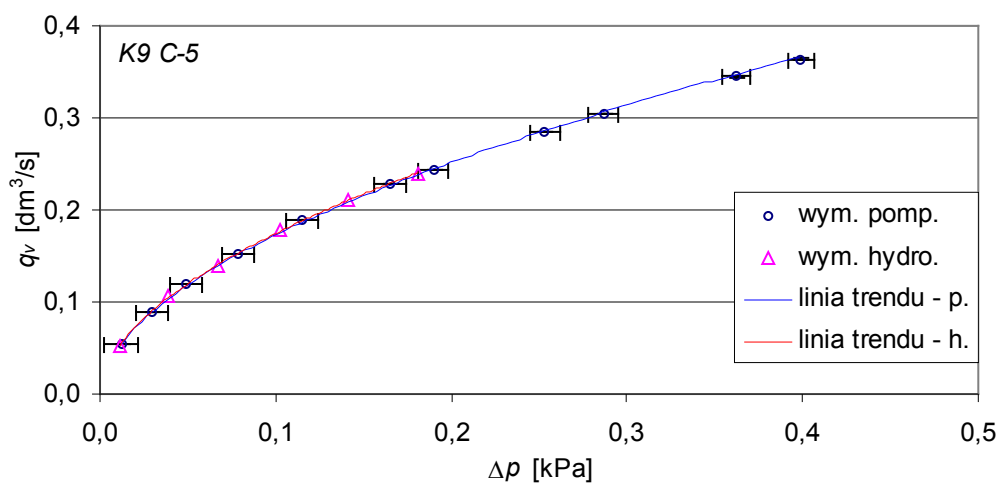
Rys. 3.4.6. Strumień objętości w funkcji ciśnienia spiętrzenia $q_v=f(\Delta p)$ między punktami C-5 dla kolana K6 dla różnych wymuszeń



Rys. 3.4.7. Strumień objętości w funkcji ciśnienia spiętrzenia $q_v=f(\Delta p)$ między punktami C-5 dla kolana K7 dla różnych wymuszeń



Rys. 3.4.8. Strumień objętości w funkcji ciśnienia spiętrzenia $q_v=f(\Delta p)$ między punktami C-5 dla kolana K8 dla różnych wymuszeń



Rys. 3.4.9. Strumień objętości w funkcji ciśnienia spiętrzenia $q_v=f(\Delta p)$ między punktami C-5 dla kolana K9 dla różnych wymuszeń

W tabeli 3.4.1 przedstawiono wartości współczynników determinacji r^2 oraz wartości współczynników proporcjonalności a i wykładników potęgowych w równań modeli typu $q_v = a \cdot \Delta p^w$ wyznaczonych indywidualnie, dla każdego badanego przepływomierza kolanowego, przy wymuszeniu przepływu wody w układzie pomiarowym za pomocą odśrodkowej pompy wirowej oraz grawitacyjnie (tzw. wymuszenie hydrostatyczne).

Tabela 3.4.1. Wartości współczynników: determinacji r^2 , proporcjonalności a i wykładników potęgowych w , równań trendu $q_v = a \cdot \Delta p^w$

Badane kolano przepływowe	Rodzaj wymuszenia przepływu	Współczynnik proporcjonalności a	Wykładnik potęgi w	Współczynnik determinacji r^2
K1 C-5	-pompa	0,1226±0,0012	0,5028±0,0020	0,9993
	-grawitacja	0,1221±0,0008	0,4967±0,0017	0,9996
K2 C-5	-pompa	0,1424±0,0005	0,5147±0,0021	0,9998
	-grawitacja	0,1442±0,0006	0,5239±0,0021	0,9996
K3 C-5	-pompa	0,1792±0,0007	0,5276±0,0007	0,9998
	-grawitacja	0,1770±0,0006	0,5170±0,0013	1,0000
K4 C-5	-pompa	0,2278±0,0008	0,4954±0,0012	0,9995
	-grawitacja	0,2291±0,0009	0,4953±0,0012	0,9999
K5 C-5	-pompa	0,2345±0,0009	0,5121±0,0011	0,9996
	-grawitacja	0,2360±0,0010	0,5119±0,0018	0,9983
K6 C-5	-pompa	0,2562±0,0009	0,5099±0,0009	0,9999
	-grawitacja	0,2573±0,0011	0,5089±0,0014	0,9999
K7 C-5	-pompa	0,2692±0,0015	0,5038±0,0059	0,9973
	-grawitacja	0,2718±0,0012	0,5138±0,0033	0,9997
K8 C-5	-pompa	0,3472±0,0023	0,4871±0,0078	0,9991
	-grawitacja	0,3460±0,002	0,4880±0,0039	0,9981
K9 C-5	-pompa	0,5868±0,0087	0,5253±0,0089	0,9993
	-grawitacja	0,5784±0,0079	0,5191±0,0071	0,9996

Na podstawie przeprowadzonych wyników pomiarów doświadczalnych wyznaczono średnie wartości wykładników potęgowych \bar{w} (wyznaczonych z równań modeli typu $q_v = a \cdot \Delta p^w$ indywidualnie dla każdej z 10 serii pomiarowych) i umieszczono w tabeli 3.4.1 wraz z wynikającymi z pomiarów dla tej wartości, wielkościami niepewności rozszerzonej U_w i zapisano w postaci:

$$w = \bar{w} \pm U_w \quad (3.7)$$

W podobny sposób obliczono i wyznaczono wartości średnie współczynnika proporcjonalności \bar{a} z odpowiadającymi im wartościami niepewności rozszerzonej U_a i zapisano w postaci:

$$a = \bar{a} \pm U_a \quad (3.8)$$

W celu wyznaczenia niepewności rozszerzonych, dla wartości średniej wykładnika potęgowego \bar{w} i średniej wartości współczynnika proporcjonalności \bar{a} , postępowano wg procedury szacowania niepewności typu A, obliczając odchylenia standardowe pojedynczego pomiaru, a następnie odchylenie standardowe średniej arytmetycznej [69].

W pierwszej kolejności obliczono odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru na podstawie odchylenia standardowego σ z równań:

$$\sigma = u(w) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(w_i - \bar{w})^2}{n-1}} \quad (3.9)$$

$$\sigma = u(a) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(a_i - \bar{a})^2}{n-1}} \quad (3.10)$$

Dla każdego przepływomierza kolanowego wykonano 10 serii pomiarów, oddzielnie dla wymuszenia przepływu pompą i hydrostatycznie, z których wyznaczono wartości niepewności standardowej w oparciu o wartość średnią wykładnika potęgowego \bar{w} oraz średnią wartość współczynnika proporcjonalności \bar{a} z serii. W tym przypadku niepewności $u(\bar{w})$ i $u(\bar{a})$ określono jako odchylenie standardowe eksperymentu średniej arytmetycznej z równań:

$$u(\bar{w}) = \frac{u(w)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2}{n(n-1)}} \quad (3.11)$$

$$u(\bar{a}) = \frac{u(a)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{n(n-1)}} \quad (3.12)$$

Niepewność rozszerzoną U wyznaczono z zależności:

- dla średniej wartości wykładnika potęgowego \bar{w} ,

$$U_m = k_p \cdot u(\bar{w}) \quad (3.13)$$

- dla średniej wartości współczynnika proporcjonalności \bar{a} ,

$$U_a = k_p \cdot u(\bar{a}) \quad (3.14)$$

gdzie przyjęto:

- n - liczba serii pomiarowych ($n = 10$),
- w_i - kolejne wartości wykładników potęgowych w serii,
- a_i - kolejne wartości współczynników proporcjonalności w serii,
- \bar{w} - wartość średnia wykładnika potęgi z serii,
- \bar{a} - wartość średnia współczynnika proporcjonalności z serii,
- k_p - współczynnik rozszerzenia (przyjęto $k_p=2,23$ z rozkładu Studenta dla poziomu ufności $p = 95\%$).

W tabeli 3.4.1. przedstawiono (dla przebadanych kolan $K1$ do $K9$) wartości wykładników potęgowych w , z których najmniejszą wartość wyznaczono dla kolana $K8$ przy wymuszeniu pompą wirową, wartość ta wynosi $w = 0,4871 \pm 0,0078$. Natomiast maksymalną wartość wykładnika potęgowego, wyznaczono dla kolana $K3$, także przy wymuszeniu pompą wirową dla którego $w = 0,5276 \pm 0,0007$.

Współczynnik proporcjonalności a zależny między innymi od współczynnika przepływu, jego wartość wzrasta od $a = 0,1221 \pm 0,0008$ dla kolana $K1$ do wartości $a = 0,5868 \pm 0,0087$ dla kolana $K9$, wraz ze wzrostem wymiarów geometrycznych (R , d) badanych kolan przepływowych.

Występujący tutaj współczynnik determinacji r^2 przyjmuje teoretycznie wartości z przedziału od zera do jedność. Im jego wartość jest bliższa jedność, tym przyjęty model obliczeniowy jest w większym stopniu dopasowany do rzeczywistych wartości zmiennych pomiarowych. Do wyznaczonych w badaniach doświadczalnych charakterystyk przepływowych, przepływomierzy kolanowych, dopasowano indywidualnie funkcje wykładnicze typu $q_v = a \cdot \Delta p^w$, dla których współczynnik

determinacji (dopasowania) r^2 zawierał się w granicach od 0,9973 (dla kolana K7) do 1,0 (dla kolana K3), co świadczy o bardzo dobrym, wręcz idealnym ich dopasowaniu do wyników doświadczalnych (otrzymanych z pomiarów przepływu).

Porównując strumień objętości określony znaną zależnością (1.20) z strumieniem wyznaczonym metodą najmniejszych kwadratów ($q_v = a \cdot \Delta p^w$) w oparciu o badania doświadczalne, wyznaczono współczynnik przepływu przepływomierza kolanowego C na podstawie współczynnika proporcjonalności a i przedstawiono w postaci równania:

$$C = \frac{4 \cdot a}{\pi \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{R}{d}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho}}} \quad (3.15)$$

gdzie:

R/d - względny średni promień gięcia

d - średnica wewnętrzna rurociągu

ρ - gęstość cieczy

Analizę niepewności pomiaru strumienia objętości dla przepływomierzy kolanowych przeprowadzono korzystając z metody ważenia statycznego [20, 45, 63], przy założeniu, ustalonego przepływu wody w instalacji pomiarowej. W rozważaniach przyjęto, że niepewnością dominującą jest niepewność systematyczna spowodowana niedokładnością użytej do pomiarów aparatury pomiarowej. Średni strumień objętości wody \bar{q}_v , w trakcie badań mierzono pośrednio i opisano równaniem (3.16):

$$\bar{q}_v = \frac{\Delta V}{\tau} = \frac{\frac{m_1 - m_0}{\rho}}{\tau} \quad (3.16)$$

gdzie:

ΔV - przyrost objętości wody w zbiorniku pomiarowym umieszczonym na wadze,

m_0 - masa początkowa zbiornika pomiarowego umieszczonego na wadze,

m_1 - masa końcowa zbiornika pomiarowego umieszczonego na wadze,

ρ - gęstość wody,

τ - czas napełnienia zbiornika na wadze.

Dla takiego pomiaru (pośredniego) opisanego równaniem (3.16), przy uwzględnieniu najbardziej niekorzystnej sytuacji, obliczono błąd graniczny wielkości średniego

strumienia objętości jako sumą bezwzględnych wartości wszystkich błędów i zapisano w następującej postaci:

$$\delta_{q_v} = |\delta_{\Delta m}| + |\delta_{\rho}| + |\delta_{\tau}| \quad (3.17)$$

gdzie: $\delta_{\Delta m} = \frac{\sqrt{2} \cdot \Delta m_g}{m_1 - m_0}$, $\delta_{\rho} = \frac{\Delta \rho_g}{\rho}$, $\delta_{\tau} = \frac{\Delta \tau_g}{\tau}$

oznaczają maksymalne względne błędy graniczne wielkości mierzonych bezpośrednio (prostych).

Przez symbol Δ_g oznaczono błąd graniczny systematyczny mierzonej wartości, który np. dla cyfrowego miernika pomiarowego określono zależnością:

$$\Delta_g = \pm (0,01 \cdot K_1 \cdot \text{zakres} + 0,01 \cdot K_2 \cdot \text{wartość mierzona} + \text{waga} \cdot \text{ostatnia cyfra}) \quad (3.18)$$

gdzie:

K_1, K_2 – wartości podane przez producenta (wartości, zwykle w procentach)

Korzystając z instrukcji obsługi przyrządów pomiarowych, wykorzystywanych w badaniach określono błędy graniczne pomiarów dla użytych zakresów:

- dla miliamperomierza cyfrowego SANWA PC 5000 ($K_1 = 0$; $K_2 = 0,15$; $waga = 10$; rozdzielczość = 0,001mA), dla wartości mierzonej 20mA maksymalny błąd bezwzględny pomiaru natężenia prądu wynosi:

$$\Delta_{mA} = \pm (0,01 \cdot 0,15 \cdot 20 + 10 \cdot 0,001) = \pm 0,04 \text{ mA}$$

- dla wagi z odczytem cyfrowym MENSOR MW150 maksymalny błąd pomiaru przy odczycie na wyświetlaczu wagi wynosi ± 50 g, natomiast korzystając z interfejsu RS 232C uzyskuje się mniejszy dopuszczalny błąd graniczny wynoszący:

$$\Delta_m = \pm 5 \text{ g}$$

- dla sekundomierza cyfrowego SIMEX LC-50/Fa ($K_1 = 0$; $K_2 = 0,01$; $waga = 1$; rozdzielczość = 0,001 s) maksymalny bezwzględny błąd pomiaru czasu dla maksymalnego czasu występującego w pomiarach (dla przepływomierz kolanowego KI, $\tau = 952$ s) wynosi:

$$\Delta_{\tau} = \pm (0,01 \cdot 0,01 \cdot 952 + 1 \cdot 0,001) = \pm 0,097 \text{ s}$$

- dla przetwornika różnicy ciśnień APR-2000/0...4 kPa/ maksymalny błąd bezwzględny pomiaru ciśnienia spiętrzenia obliczono korzystając z

charakterystyki podanej przez producenta przetwornika i dla ustawionego zakresu pomiarowego 0÷4 kPa ($K_I = 0,1$) odpowiednio wynosi:

$$\Delta_{\Delta p} = \pm (0,01 \cdot 0,1 \cdot 4000) = \pm 4,0 \text{ Pa} \quad (\text{w zakresie } 1200 \div 4000 \text{ Pa})$$

$$\Delta_{\Delta p} = \pm (10 - 0,005 \cdot \Delta p) \text{ Pa} \quad (\text{w zakresie } 0 \div 1200 \text{ Pa})$$

- przyjęto maksymalny błąd bezwzględny rozkładu gęstości wody w oparciu o tabelę gęstości wody w funkcji temperatury $\rho = f(t)$ oraz niepewność mierzonej temperatury ($\pm 1^\circ\text{C}$) wody z zakresu $t = 20 \div 22^\circ\text{C}$, który wynosi:

$$\Delta_\rho = \pm 0,22 \text{ kg/m}^3$$

W oparciu o wyznaczone maksymalne błędy graniczne wielkości mierzonych obliczono z równania (3.17), względne pomiarowe błędy graniczne:

- dla przyrostu masy zbiornika pomiarowego polegającego na wyznaczeniu różnicy między zmierzonymi masami zbiornika pomiarowego tj. minimalną masą końcową zbiornika wypełnionego wodą $m_1 = 58 \text{ kg}$, a masą początkową pustego zbiornika $m_0 = 28 \text{ kg}$,

$$\delta_{\Delta m\%} = \frac{\sqrt{2} \cdot 0,005}{58 - 28} \cdot 100\% = 0,024\%$$

- dla gęstości wody w temperaturze $t = 21^\circ\text{C} \pm 1^\circ$,

$$\delta_{\rho\%} = \frac{0,22}{998} \cdot 100\% = 0,022\%$$

- dla zmierzonego min. czasu napełnienia zbiornika pomiarowego ($\tau = 79,5 \text{ s}$),

$$\delta_{\tau\%} = \frac{0,097}{79,5} \cdot 100\% = 0,122\%$$

Z równania (3.17) obliczono maksymalny błąd graniczny pomiaru średniego strumienia objętości metoda wagową, który dla wyznaczonych charakterystyk pomiarowych wynosi:

$$\delta_{q_v\%} = 0,024 + 0,022 + 0,122 = 0,168\%$$

Z zależności (3.17) wynika, że maksymalny bezwzględny błąd graniczny pomiaru średniego strumienia objętości obliczamy z równania:

$$|\Delta q_v| = 0,01 \cdot \delta_{q_v\%} \cdot \bar{q}_v \quad (3.19)$$

Jego wartość wynosi od $\pm 0,00005 \text{ dm}^3/\text{s}$ do $\pm 0,0007 \text{ dm}^3/\text{s}$ przy zmianie strumienia objętości w granicach od $0,027 \text{ dm}^3/\text{s}$ do $0,398 \text{ dm}^3/\text{s}$.

Jako metodę podstawową do systematycznych niepewności cząstkowych przewidziano w Przewodniku ISO [20], dla pojedynczego pomiaru metodę opartą o niepewność standardową typu B. Polega ona na przyporządkowaniu zakresowi zmienności danej wielkości wejściowej (pomiarowej), rozkładu gęstości prawdopodobieństwa (rozkład: prostokątny, trójkątny czy trapezowy). W praktyce najczęściej występują błędy aparatury pomiarowej, które charakteryzujemy za pomocą wartości błędu granicznego Δ_g określonego przez różnego rodzaju wskaźniki klasy np. dokładności [4, 28]. Dla przyrządów pomiarowych z odczytem cyfrowym przyjmuje się najczęściej rozkład prawdopodobieństwa równomierny (prostokątny), dla którego niepewność standardowa zdeterminowana typu B jest równa:

$$u_B = \frac{\Delta_g}{\sqrt{3}} \quad (3.20)$$

Natomiast niepewność standardową rozszerzoną określono równaniem:

$$U_B = k_p \cdot u_B \quad (3.21)$$

Występujący w tym równaniu współczynnik rozszerzenia przy jednostajnym rozkładzie (prostokątnym) błędów przyrządu pomiarowego dla poziomu ufności $p = 0,95$ jest równy:

$$k_p = \sqrt{3} \cdot p = \sqrt{3} \cdot 0,95 = 1,645$$

Do wyznaczenia składowych rozszerzonych niepewności standardowych dla zmierzonego średniego strumienia objętości, wykorzystano niepewności standardowe wg Przewodnika [20, 69], korzystając z równań (3.20, 3.21):

- dla pomiaru przyrostu masy:

$$U_{\Delta m} = k_p \cdot u_{B\Delta m} = 1,645 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot 0,005}{\sqrt{3}} = 0,0067 \text{ kg}$$

- dla wyznaczonej gęstości wody w temperaturze $t = 21^\circ\text{C} \pm 1^\circ$,:

$$U_\rho = k_p \cdot u_{B\rho} = 1,645 \cdot \frac{0,22}{\sqrt{3}} = 0,209 \text{ kg/m}^3$$

- dla pomiaru czasu:

$$U_\tau = k_p \cdot u_{B\tau} = 1,645 \cdot \frac{0,097}{\sqrt{3}} = 0,092 \text{ s}$$

Następnie obliczono procentowe względne rozszerzone niepewności standardowej mierzonych wartości:

- dla przyrostu masy zbiornika pomiarowego $\Delta m = m_1 - m_0$ (gdzie: $m_1 = 58$ kg, $m_0 = 28$ kg),

$$U_{\Delta m \%} = \frac{1,645}{58 - 28} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot 0,005}{\sqrt{3}} \cdot 100\% = 0,023\%$$

- dla gęstości wody w temperaturze $t = 21^\circ\text{C} \pm 1^\circ$,

$$U_{\rho \%} = \frac{1,645}{998} \cdot \frac{0,22}{\sqrt{3}} \cdot 100\% = 0,021\%$$

- dla zmierzonego min. czasu napełnienia zbiornika pomiarowego ($\tau = 79,5$ s),

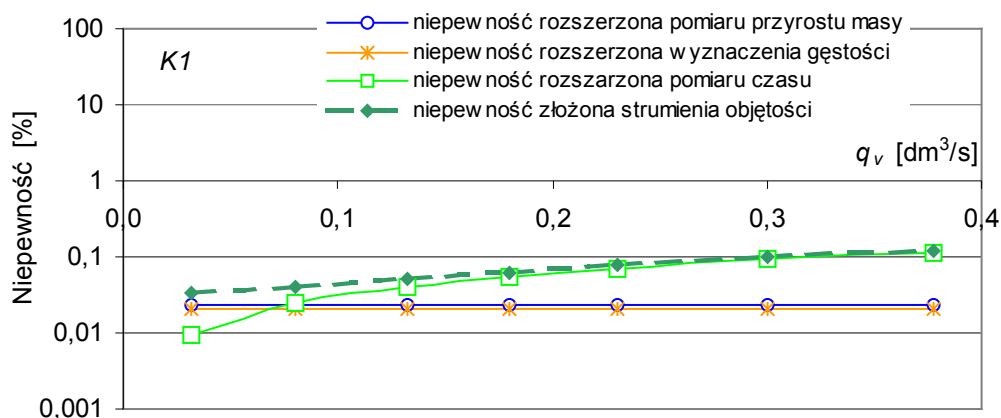
$$U_{\tau \%} = \frac{1,645}{79,5} \cdot \frac{0,097}{\sqrt{3}} \cdot 100\% = 0,116\%$$

Niepewność standardowa złożona pomiaru strumienia objętości, jest wypadkową trzech podstawowych składowych związanych z poszczególnymi członami równania (3.16), którą wyrażono równaniem:

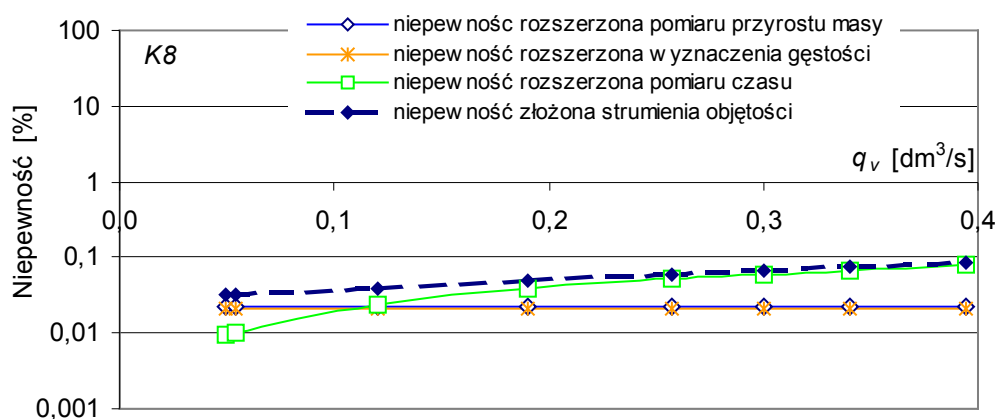
$$U_{q_v \%} = \sqrt{U_{\Delta m \%}^2 + U_{\rho \%}^2 + U_{\tau \%}^2} \quad (3.22)$$

Po podstawieniu obliczonych składowych rozszerzonych niepewności standardowych do równania (3.22), otrzymano wartość niepewności standardowej złożonej:

$$U_{q_v \%} = \sqrt{0,023^2 + 0,021^2 + 0,116^2} = 0,12\%$$



Rys. 3.4.10. Względna niepewność pomiaru strumienia objętości i jej poszczególne składniki (m , ρ , τ) w zależności od strumienia dla przepływomierza z kolanem *K1*



Rys. 3.4.11. Względna niepewność pomiaru strumienia objętości i jej poszczególne składniki (m , ρ , τ) w zależności od strumienia dla przepływomierza z kolaniem $K8$

Na rys. 3.4.10 i 3.4.11 przedstawiono udziały poszczególnych składników niepewności stanowiska pomiarowego w zależności od strumienia objętości q_v dla wybranych przepływomierzy z kolanami $K1$ i $K8$.

Bezwzględną niepewność standardową złożoną średniego pomiaru strumienia objętości wyznaczono z równania:

$$|\Delta q_v| = 0,01 \cdot U_{q_v, \%} \cdot \bar{q}_v \quad (3.23)$$

Jej wartość wynosi od $\pm 0,00004 \text{ dm}^3/\text{s}$ do $\pm 0,0005 \text{ dm}^3/\text{s}$ w zakresie zmian strumienia objętości od $0,027 \text{ dm}^3/\text{s}$ do $0,398 \text{ dm}^3/\text{s}$ i jest zbyt mała, by można ją było przedstawić w formie słupków na wykresach rys. 3.4.1 do 3.4.9.

Wynik końcowy pomiaru strumienia objętości dla wyznaczonej niepewności standardowej złożonej przy poziomie ufności $p = 0,95$ zapisano w postaci:

$$q_v = (\bar{q}_v \pm \Delta q_v) \quad (3.24)$$

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że obliczona wartość systematyczna błędu granicznego pomiaru $\delta_{q_v} = 0,168\%$ jest większa od obliczonej wartości niepewności standardowej złożonej $U_{q_v} = 0,12\%$.

Oszacowanie niepewności standardowej złożonej $U_{\Delta p_l}$ pomiaru ciśnienia spiętrzenia na kolanie pomiarowym przepływomierza, dokonano na podstawie wypadkowej niepewności pomiaru ciśnienia spiętrzenia (na wewnętrznym i zewnętrznym łuku kolana) przetwornikiem różnicy ciśnień i niepewności pomiaru prądu wyjściowego z przetwornika, korzystając z zależności (3.25):

$$U_{\Delta p I \%} = \sqrt{U_{\Delta p \%}^2 + U_{mA \%}^2} \quad (3.25)$$

Do jej wyznaczenia, obliczono niepewności standardowe rozszerzone z równania (3.21) w których uwzględniono niepewności standardowe z równania (3.20), dla przyjętego prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa błędów przyrządów pomiarowych przy współczynniku rozszerzenia $k_p = 1,645$ na poziomie ufności $p = 0,95$. Po podstawieniu wartości, obliczono maksymalne niepewności standardowe rozszerzone mierzonych wielkości, które odpowiednio wynoszą:

- dla przetwornika różnicy ciśnień w zakresie pomiarowym 1200÷4000 Pa:

$$U_{\Delta p \%} = 1,645 \cdot \frac{4,0}{\sqrt{3}} \cdot \frac{100\%}{1200} = 0,32\%$$

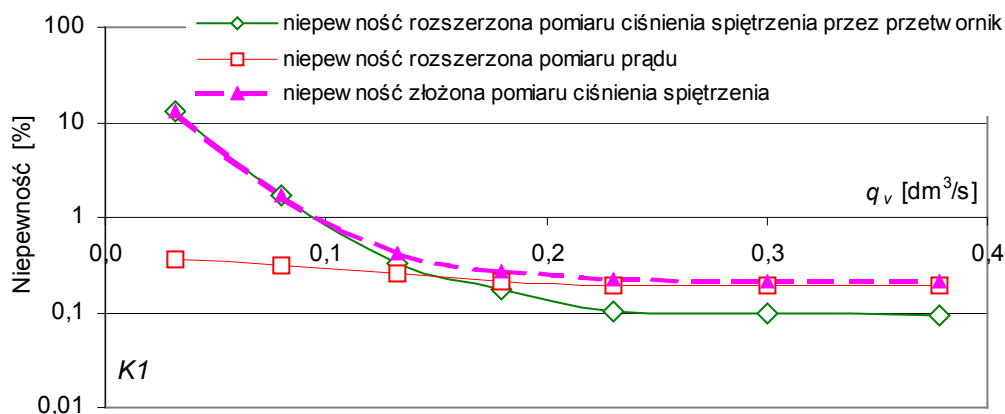
- dla miliamperomierza SANWA PC 5000 w przypadku pomiaru minimalnego sygnału prądowego o wartości 4,0 mA:

$$U_{mA \%} = 1,645 \cdot \frac{0,04}{\sqrt{3}} \cdot \frac{100\%}{4} = 0,95\%$$

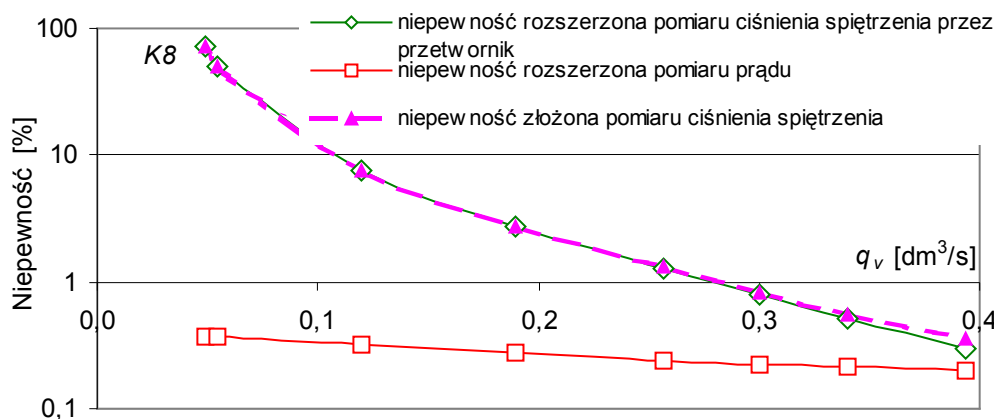
Z równania (3.24) obliczono, maksymalną wartość niepewności standardowej złożonej pomiaru ciśnienia spiętrzenia na kolanie przepływomierza, która dla przyjętego układu pomiarowego i minimalnego ciśnienia spiętrzenia $\Delta p = 1200$ Pa jest równa:

$$U_{\Delta p I \%} = \sqrt{0,32^2 + 0,95^2} = 1,0\%$$

w zakresie mierzonych ciśnień spiętrzenia (1200÷4000 Pa).



Rys. 3.4.12. Względna niepewność pomiaru strumienia objętości i jej poszczególne składniki (Δp , I) w zależności od strumienia dla przepływomierza z kolaniem $K1$



Rys. 3.4.13. Względna niepewność pomiaru strumienia objętości i jej poszczególne składniki (Δp , I) w zależności od strumienia dla przepływomierza z kolanem $K8$

Na rys. 3.4.12 i 3.4.13 przedstawiono udziały poszczególnych składników niepewności układu pomiarowego spiętrzenia ciśnienia i pomiaru prądu z rys. 3.1.3 w zależności od strumienia objętości q_v , dla wybranych przepływomierzy z kolanami $K1$ i $K8$.

Maksymalną bezwzględną niepewność standardową złożoną pomiaru ciśnienia spiętrzenia wyznaczono z równania:

$$|\Delta p_{\Delta p}| = 0,01 \cdot U_{\Delta p 1\%} \cdot \Delta \bar{p} \quad (3.26)$$

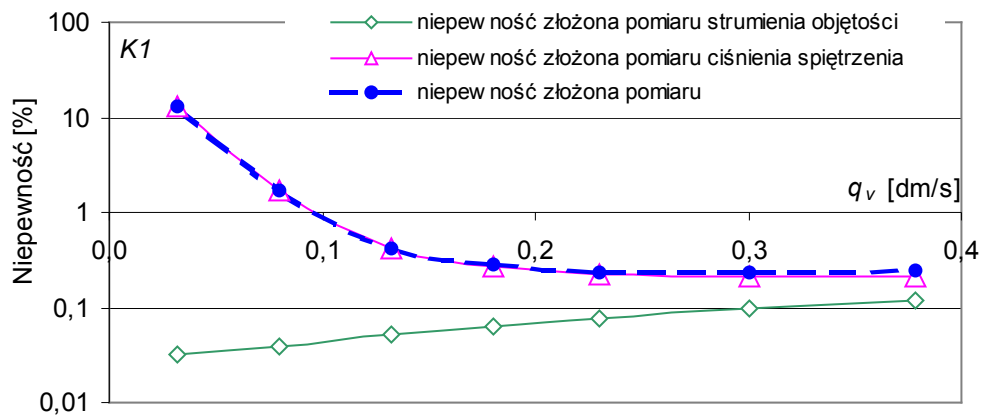
Jej wartość nie przekracza ± 12 Pa dla spiętrzenia ciśnienia $\Delta \bar{p} = 1200$ Pa i ± 40 Pa dla spiętrzenia $\Delta \bar{p} = 4000$ Pa. Dla przebadanych kolan, maksymalne wartości bezwzględnej złożonej niepewności standardowej pomiaru ciśnienia spiętrzenia, przedstawiono na wykresach rys. 3.4.1 do 3.4.9, w formie słupków dla punktów pomiarowych przy wymuszeniu pompą. Z wykresów na powyższych rysunkach wynika również, że bezwzględna złożona niepewność standardowa pomiaru ciśnienia spiętrzenia wzrasta w miarę zmniejszania szerokości zakresu pomiarowego i jest ściśle związana z użytym do pomiarów przetwornikiem różnicy ciśnień, a w mniejszym stopniu zależy od użytego miernika prądu w pętli pomiarowej 4÷20 mA szczególnie dla niewielkich spiętrzeń.

Wynik końcowy, pomiaru ciśnienia spiętrzenia dla wyznaczonej niepewności standardowej złożonej, przy poziomie ufności $p = 0,95$ zapisano w postaci:

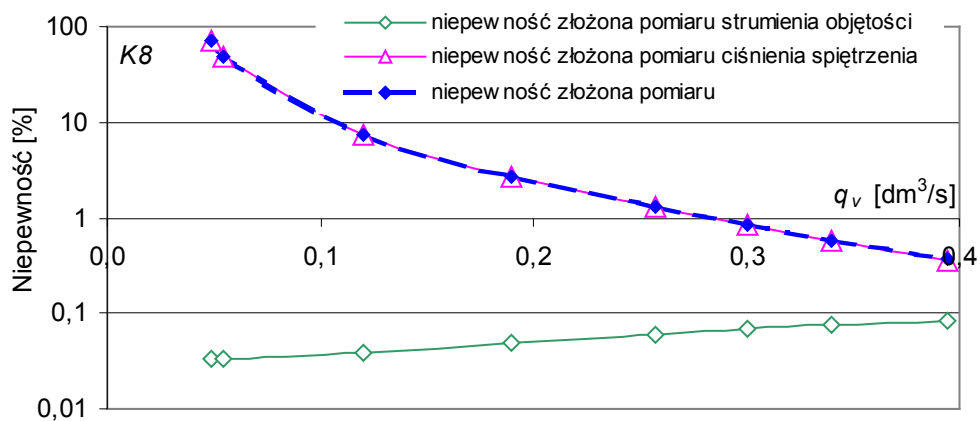
$$\Delta p = (\Delta \bar{p} \pm \Delta p_{\Delta p}) \quad (3.27)$$

Uwzględniając równania (3.22 i 3.25) oszacowano niepewność złożoną pomiaru strumienia przepływu dla wybranych kolan przepływowych $K1$ i $K8$, jako sumę

geometryczną niepewności złożonej strumienia (zależnego od: m , ρ , τ) i niepewności złożonej ciśnienia spiętrzenia (zależnego od: Δp , l). Można również stwierdzić, że źródła błędów będących przyczyną niepewności obu składników są niezależne od siebie.



Rys. 3.4.14. Względna niepewność pomiaru strumienia objętości i jej poszczególne składniki w zależności od strumienia dla przepływomierza z kolaniem $K1$



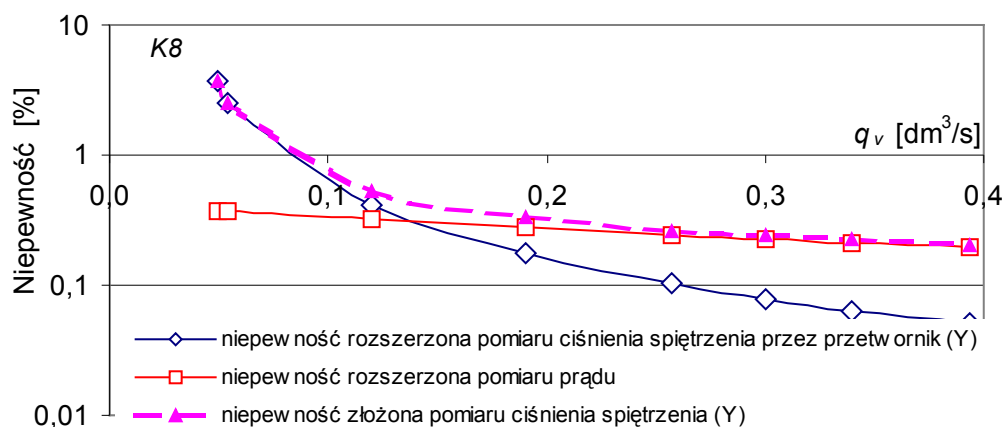
Rys. 3.4.15. Względna niepewność pomiaru strumienia objętości i jej poszczególne składniki w zależności od strumienia dla przepływomierza z kolaniem $K8$

Obliczone wyniki oszacowania niepewności złożonej przedstawiono w postaci wykresów na rys. 3.4.14 i 3.4.15. Z przedstawionych na powyższych wykresach oszacowań niepewności dla wybranych kolan $K1$ i $K8$ wynika, że w układzie pomiarowym dominującym składnikiem generującym dużą niepewność pomiaru w zakresie małych ciśnień jest zastosowany przetwornik różnicy ciśnień APR-2000, którym mierzono spiętrzenia w punktach poboru ciśnienia. Z przedstawionego wykresu na rys. 3.4.12 wynika, że dla kolana $K1$ oszacowana wartość niepewności pomiaru strumienia objętości przekracza 1%, już przy spiętrzeniu ciśnienia mniejszym od ok. 0,65 kPa. Odpowiada to występującemu w tym przypadku strumieniowi objętości

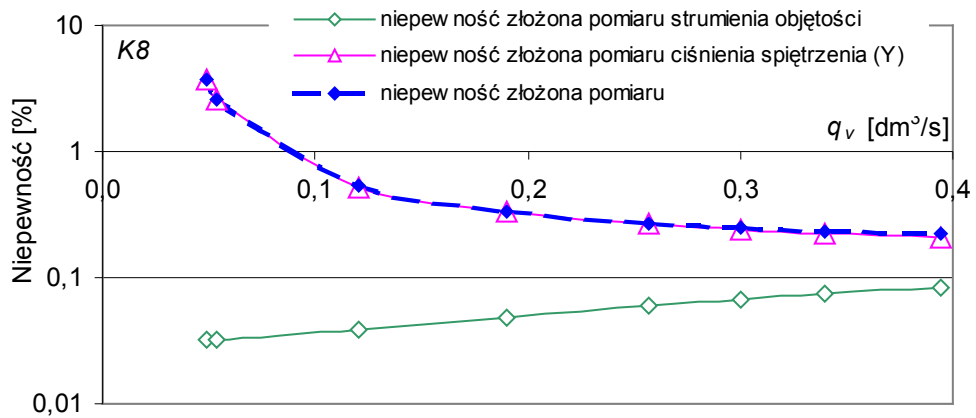
równemu ok. $0,095 \text{ dm}^3/\text{s}$. Podobnie jest na wykresie z rys. 3.4.13 dla kolana $K8$, gdzie oszacowana wartość niepewności pomiaru strumienia objętości przekracza 1% też przy spiętrzeniu mniejszym od ok. $0,65 \text{ kPa}$. W tym przypadku odpowiada to strumieniowi objętości równemu ok. $0,28 \text{ dm}^3/\text{s}$. Dla spiętrzeń mniejszych od ok. 1200 Pa niepewnością dominującą przy szacowaniu niepewności pomiaru strumienia jest niepewność związana z pomiarem ciśnienia spiętrzenia na kolanie pomiarowym przepływomierza. Dla ciśnień spiętrzenia powyżej ok. 1200 Pa zaczyna dominować niepewność związana z zastosowanym miernikiem prądu stałego, włączonym szeregowo z przetwornikiem różnicy ciśnień (spiętrzenia) w tzw. pętłę prądową $4\div 20 \text{ mA}$.

Na wykresach z rys. 3.4.14 i 3.4.15 przedstawiono oszacowania względnych niepewności złożonych pomiaru strumienia objętości kolan $K1$ i $K8$, z których wynika, że niepewnością dominującą w całym zakresie pomiaru strumienia objętości jest niepewność związana z niepewnością złożoną pomiaru spiętrzenia (niepewność związana z pomiarem Δp i I).

Zmniejszenie niepewności pomiaru strumienia objętości, szczególnie w zakresie niewielkich spiętrzeń, można uzyskać wykorzystując do pomiaru strumienia precyzyjny przetwornik różnicy ciśnień np. Yokogawa EJV 110A z głowicą pomiarową typu F, w miejsce przetwornika APR-2000. Dla tak dobranego przetwornika przedstawiono na rys. 3.4.16 i 3.4.17 symulacje oszacowania niepewności pomiaru strumienia objętości w przypadku małych spiętrzeń (poniżej 1200 Pa) dla kolana $K8$.



Rys. 3.4.16. Względna niepewność pomiaru strumienia objętości i jej poszczególne składniki (Δp , I) w zależności od strumienia dla przepływomierza z kolaniem $K8$ i przetwornikiem Yokogawa



Rys. 3.4.17. Względna niepewność złożona pomiaru strumienia objętości i jej poszczególne składniki w zależności od strumienia dla przepływomierza z kolanem K8 i przetwornikiem Yokogawa

Z przeprowadzonej symulacji wynika, że w przypadku zastosowania do pomiaru strumienia q_v przetwornika różnicy ciśnień Yokogawa EJX 110A, oszacowana wartość niepewności pomiaru strumienia objętości przekracza 1% przy spiętrzeniach mniejszych od ok. 65 Pa. Dla wybranego przepływomierza z kolanem K8 odpowiada to strumieniowi objętości równemu ok. 0,08 dm³/s.

3.5. Testowanie wybranych hipotez statystycznych

W naukach wykorzystujących związki empiryczne, stwierdzenia dotyczące zależności między wielkościami stanowiącymi przedmiot badań porównano z wynikami eksperymentu. Jeżeli stwierdzenia te można sformułować w oparciu o statystykę matematyczną i przedstawić w postaci rozkładów określonych populacji zmiennych, to wówczas nazywa się je hipotezami statystycznymi. Sprawdzenie przyjętych hipotez statystycznych z eksperymentem, polega na typowym statystycznym wnioskowaniu o rozkładzie zbiorowości generalnej (populacji) na podstawie wyników pomiarów eksperymentu pochodzących z próby losowej z tej populacji [10, 31, 36, 52, 56, 60, 63].

Podstawowym testem, z którego korzysta się, jest tzw. test zgodności rozkładów chi-kwadrat, oznaczany jako χ^2 . Za jego pomocą z założonym prawdopodobieństwem sprawdza się czy rozkład wyznaczony w eksperymencie pokrywa się z rozkładem normalnym Gaussa. Testem tym sprawdzano wyniki pomiarów przepływu wody przez badane przepływomierze kolanowe (K1÷K9), dla których wykonano po 10 charakterystyk przepływowych, przy wymuszeniu przepływu odśrodkową pompą wirową oraz hydrostatycznie. Do wyznaczonych charakterystyk dopasowano indywidualnie modele obliczeniowe typu $q_v = a \cdot \Delta p^w$. Sprawdzeniu poddano w tym teście współczynniki potęgi w , których wartości otrzymano z równań modeli, indywidualnie dla każdego przepływomierza kolanowego jak i sposobu wymuszenia przepływu. Dla ich rozróżnienia wprowadzono dodatkowe oznaczenia, w postaci indeksu dolnego p oznaczającego wymuszenie przepływu za pomocą pompy i indeksu dolnego h oznaczającego wymuszenie przepływu hydrostatyczne (grawitacyjne). Wówczas oznaczone współczynniki potęgi przedstawiono w postaci: w_p i w_h . Dla każdego rodzaju wymuszenia i każdego przebadanego przepływomierza kolanowego z wyznaczonych wartości wykładnika potęgowego obliczono najlepsze przybliżenia: wartości średnich z równań:

$$\bar{w}_p = \sum_{i=1}^n \frac{w_{pi}}{n} \quad \text{i} \quad \bar{w}_h = \sum_{i=1}^n \frac{w_{hi}}{n} \quad (3.28)$$

odchyłeń standardowych pojedynczego pomiaru z równań:

$$\sigma(w_p) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_{pi} - \bar{w}_p)^2}{n-1}} \quad \text{i} \quad \sigma(w_h) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_{hi} - \bar{w}_h)^2}{n-1}} \quad (3.29)$$

W dalszej kolejności podzielono rozstęp wartości wykładnika potęgi z indeksem dolnym p przebadanego przepływomierza kolanowego na cztery przedziały które oznaczono jako:

- $k = 1$ dla zakresu wartości znajdujących się w przedziale $w_p < \bar{w}_p - \sigma(w_p)$,
- $k = 2$ dla zakresu wartości znajdujących się w przedziale $\bar{w}_p - \sigma(w_p) < w_p < \bar{w}_p$,
- $k = 3$ dla zakresu wartości znajdujących się w przedziale $\bar{w}_p < w_p < \bar{w}_p + \sigma(w_p)$,
- $k = 4$ dla zakresu wartości znajdujących się w przedziale $\bar{w}_p + \sigma(w_p) < w_p$.

Podobnie postąpiono z wykładnikiem potęgi oznaczonym indeksem h . Procedury te powtórzono kolejno dla każdego przebadanego przepływomierza kolanowego. Następnie w każdym z przyjętych przedziałów wyznaczono (policzono), ile znajduje się w nim pomiarów ze zbioru n prób otrzymanych w doświadczeniu, oznaczając je jako Q_k (Q_1, Q_2, Q_3, Q_4). W każdym z przyjętych przedziałów z ustalonym prawdopodobieństwem (wyznaczonym w oparciu o pole powierzchni pod wykresem funkcji Gaussa) obliczano oczekiwaną (teoretyczną) liczbę pomiarów E_k , która odpowiednio wynosi: $E_1 = 0,16 \cdot n$, $E_2 = 0,34 \cdot n$, $E_3 = 0,34 \cdot n$, $E_4 = 0,16 \cdot n$. W oparciu o wyznaczone wartości przeprowadzono test zgodności rozkładów chi-kwadrat który opisano równaniem:

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^i \frac{(Q_k - E_k)^2}{E_k} \quad (3.30)$$

W przypadku, gdy spełniony jest warunek, że liczba $\chi^2 \leq i$ (w naszym przypadku $i = 4$) to otrzymany rozkład jest zgodny, w stopniu zadawalającym z rozkładem (normalnym) oczekiwanym. Dla przypadku gdy liczba $\chi^2 \gg i$, brakuje podstaw do stwierdzenia, że otrzymany rozkład jest zgodny z rozkładem oczekiwanym.

Wyniki obliczeń liczby χ^2 dla przebadanych przepływomierzy kolanowych przy wymuszeniu przepływu odśrodkową pompą wirową i/lub hydrostatycznie przedstawiono w tabeli 3.5.1..

Tabela 3.5.1. Wyznaczone wartości χ^2 dla przebadanych przepływomierzy kolanowych

Badane przepływomierze kolanowe	Test zgodności rozkładów χ^2	
	Wymuszenie pompą	Wymuszenie hydrostatyczne
<i>K1 C-5</i>	0,48	6,84
<i>K2 C-5</i>	11,32	10,00
<i>K3 C-5</i>	0,66	0,29
<i>K4 C-5</i>	0,29	0,48
<i>K5 C-5</i>	1,95	0,48
<i>K6 C-5</i>	0,48	1,95
<i>K7 C-5</i>	0,29	0,48
<i>K8 C-5</i>	0,29	0,29
<i>K9 C-5</i>	1,65	3,13

W przedstawionej tabeli 3.5.1 zebrano wyniki liczby chi-kwadrat dla wykładnika potęgowego w z równania modelu obliczeniowego. Dla przepływomierza kolanowego *K2*, przy wymuszeniu przepływu pompą wirową i hydrostatycznie, jak i przepływomierza kolanowego *K1*, przy hydrostatycznym wymuszeniu przepływu, wartości χ^2 są większe od liczby przedziałów $i = 4$ (nie spełniają warunku $\chi^2 \leq 4$). Oznacza to, że otrzymany rozkład wartości współczynnika potęgi w w tych przypadkach odbiega od rozkładu oczekiwanego (Gaussa). W pozostałych przypadkach wartość liczby chi-kwadrat sugeruje, że rozkład wykładnika potęgi w jest zgodny z rozkładem normalnym.

W dalszej kolejności na podstawie wyników pomiarów pochodzących z próby losowej, można podjąć decyzję o prognozowanym ich rozkładzie poprzez sformułowanie hipotezy zerowej lub alternatywnej. Rozważania sprowadzają się wtedy zazwyczaj do stwierdzenia, czy hipoteza zerowa może być odrzucona, czy też nie. Aby ją podjąć, wymaga się przyjęcia pewnego granicznego prawdopodobieństwa. Zwykle w takich rozważaniach zakłada się, wartość prawdopodobieństwa (poziomu istotności testu) odrzucenia hipotezy wówczas, gdy jest ona prawdziwa. Tak sformułowany test nazywa się testem istotności, który pozwala, z dużym prawdopodobieństwem, odrzucić przyjętą hipotezę, w przypadku, gdy jest ona fałszywa.

W celu weryfikacji otrzymanych wyników z równań modeli obliczeniowych typu $q_v = a \cdot \Delta p^w$, przeprowadzono test istotności porównania dwóch średnich, dla współczynnika proporcjonalności a (porównanie a_p z a_h) i wykładnika potęgi w (porównanie w_p z w_h), które wyznaczono indywidualnie dla każdego przebadanego przepływomierza kolanowego.

Test istotności, dla porównania dwóch wartości średnich, dotyczy weryfikacji hipotez między dwiema średnimi, dwiema wariancjami pochodzącymi z dwóch różnych zbiorowości generalnych, wynikających z wymuszenia przepływu odśrodkową pompą wirową i hydrostatycznie. Założono, że jeżeli średnie arytmetyczne wyznaczone z prób dla współczynnika proporcjonalności \bar{a}_p i \bar{a}_h mają rozkład normalny, to ich różnica $\bar{a}_p - \bar{a}_h$ ma również rozkład normalny. W przypadku małej próby (gdy $n_p \leq 30$ lub $n_h \leq 30$), która w naszym przypadku wynosi $n_p = n_h = 10$, sprawdzeniem testu istotności porównania dwóch wartości średnich jest statystyka $T_{\bar{a}}$ dla średnich współczynników proporcjonalności \bar{a}_p i \bar{a}_h , którą przedstawiono równaniem (3.31):

$$T_{\bar{a}} = \frac{(\bar{a}_p - \bar{a}_h) - (\mu_{ap} - \mu_{ah})}{S(\bar{a}_p - \bar{a}_h)} \quad (3.31)$$

gdzie:

$$S(\bar{a}_p - \bar{a}_h) = \sqrt{\frac{n_p \cdot S_{ap}^2 + n_h \cdot S_{ah}^2}{n_p + n_h - 2} \cdot \left(\frac{1}{n_p} + \frac{1}{n_h}\right)} \quad (3.32)$$

w tym wariancje:

$$S_{ap}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (a_{pi} - \bar{a}_p)^2}{n_p - 1} \quad (3.33)$$

$$S_{ah}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (a_{hi} - \bar{a}_h)^2}{n_h - 1} \quad (3.34)$$

W praktyce, dla porównania dwóch wartości średnich współczynnika proporcjonalności \bar{a}_p z \bar{a}_h , przedstawiono test porównania dwóch wartości średnich, w którym założono:

- hipotezę zerową dla której:

$H_0 : \mu_{ap} = \mu_{ah}$ (wartości średnie ze zbiorowości generalnej są równe i mają rozkład normalny o jednakowych wariancjach przy czym parametry μ_{ap} , μ_{ah} , σ_a^2 są nieznanne)

- hipotezę alternatywną:

$H_1 : \mu_{ap} < \mu_{ah}$ lub $\mu_{ap} > \mu_{ah}$

Następnie przyjęto, jako sprawdzenie hipotezy statystykę $T_{\bar{a}}$, którą przedstawiono równaniem (3.30). Statystyka $T_{\bar{a}}$ ma rozkład t-Studenta o $n_p + n_h - 2$ stopniach swobody, gdzie S_{ap} jest odchyleniem standardowym dla próby n_p , a S_{ah} odchyleniem standardowym dla próby n_h .

W podobny sposób i przy podobnych hipotezach przeprowadzono obliczenia dla wartości średnich wykładników potęgowych \bar{w}_p i \bar{w}_h wyznaczając statystykę $T_{\bar{w}}$.

Wyniki obliczeń statystyki $T_{\bar{a}}$ i $T_{\bar{w}}$ dla średnich wartości współczynnika proporcjonalności \bar{a} i średnich wartości wykładnika potęgowego \bar{w} , przebadanych przepływomierzy kolanowych przedstawiono w tabeli 3.5.2.

Celem weryfikacji założonej hipotezy przyjęto poziom istotności $\alpha = 0,05$ dla którego poziom ufności jest równy $1 - \alpha = 0,95$.

Ponieważ w założonej hipotezie H_0 interesujące jest, czy wartości średnie zbiorowości generalnej są sobie równe, czyli $\mu_{ap} = \mu_{ah}$, co skutkuje stwierdzeniem, że w omawianym przedziale obszar krytyczny $|T_{\bar{a}}| = |T_{\bar{w}}|$. Uwzględniając natomiast hipotezę alternatywną, dopuszczającą odchylenie μ_{ap} od μ_{ah} w obu kierunkach, określono obszar krytyczny nierównością:

$$|T_{\bar{a}}| > T_{1-\alpha/2} \quad (3.35)$$

gdzie: wyrażenie $T_{1-\alpha/2}$ jest taką wartością sprawdzianu, że prawdopodobieństwo zachodzenia tej nierówności przy założeniu prawdziwości hipotezy H_0 jest równe $\alpha/2$.

W badanym przypadku statystyka $T_{1-\alpha/2} = T_{0,975}$ ma rozkład t-Studenta o $n_p + n_h - 2 = 18$ stopniach swobody, z tablicy rozkładu t-Studenta dla danej statystyki odczytano jej wartość, która wynosi:

$$T_{1-\alpha/2} = 2,101$$

Tabela 3.5.2. Wartość statystyki $T_{\bar{a}}$ i $T_{\bar{w}}$ dla przebadanych przepływomierzy kolanowych

Badane przepływomierze kolanowe	Rodzaj wymuszenia przepływu	Uśredniony współczynnik proporcjonalności \bar{a}	Uśredniony wykładnik potęgi \bar{w}	Odchylenie standardowe poj. pomiaru S_a	Odchylenie standardowe poj. pomiaru S_w	Test istotności dwóch średnich $T_{\bar{a}}$	Test istotności dwóch średnich $T_{\bar{w}}$
K1 C-5	pompą	0,1226	0,5028	0,001692	0,002839	0,693	4,857
	hydrostatycznie	0,1221	0,4967	0,001130	0,002411		
K2 C-5	pompą	0,1424	0,5147	0,000696	0,002958	-4,952	-6,623
	hydrostatycznie	0,1442	0,5239	0,000839	0,002948		
K3 C-5	pompą	0,1792	0,5276	0,000934	0,000999	5,132	15,209
	hydrostatycznie	0,1770	0,5170	0,000901	0,001821		
K4 C-5	pompą	0,2278	0,4924	0,001089	0,001585	-2,236	-3,717
	hydrostatycznie	0,2291	0,4953	0,001258	0,001744		
K5 C-5	pompą	0,2345	0,5120	0,001208	0,001516	-2,875	0,152
	hydrostatycznie	0,2362	0,5119	0,001384	0,002551		
K6 C-5	pompą	0,2562	0,5101	0,001241	0,001482	-1,736	1,098
	hydrostatycznie	0,2573	0,5092	0,001575	0,002295		
K7 C-5	pompą	0,2692	0,5038	0,002043	0,008354	-2,920	-3,126
	hydrostatycznie	0,2718	0,5138	0,001721	0,004727		
K8 C-5	pompą	0,3472	0,4871	0,003309	0,010980	1,155	-0,215
	hydrostatycznie	0,3456	0,4880	0,002724	0,005456		
K9 C-5	pompą	0,5868	0,5253	0,012286	0,012584	1,516	1,139
	hydrostatycznie	0,5784	0,5191	0,011220	0,010076		

Utworzono przedział, w którym zawarta jest wartość średnia próby \bar{a} , z której prawdopodobnie pochodzi badana próbka, winna ona mieścić się w przedziale statystyki $T_{\bar{a}}$:

$$- 2,101 < T_{\bar{a}} < 2,101$$

Podobnie postępując utworzono przedział dla statystyki $T_{\bar{w}}$ (wartości średniej próby \bar{w}):

$$- 2,101 < T_{\bar{w}} < 2,101$$

Dla tak utworzonych przedziałów, na podstawie danych z tabeli 3.5.2 stwierdzono, że w utworzonych przedziałach dla testu istotności dwóch średnich, mieszczą się wartości statystyki $T_{\bar{a}}$ dla przepływomierzy kolanowych: $K1$, $K6$, $K8$, $K9$ i statystyki $T_{\bar{w}}$ dla przepływomierzy kolanowych: $K5$, $K6$, $K8$, $K9$.

Podsumowując stwierdzono, że dla tych wymienionych przepływomierzy kolanowych brak jest podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej H_0 , czyli średnie wartości \bar{a} (dla statystyki $T_{\bar{a}}$) lub \bar{w} (dla statystyki $T_{\bar{w}}$) przy wymuszeniu pompą wirową lub hydrostatycznie nie różnią się w sposób istotny (na poziomie istotności testu 0,05). W pozostałych przypadkach występują istotne różnice pomiędzy średnimi wartościami \bar{a} (dla statystyki $T_{\bar{a}}$) lub \bar{w} (dla statystyki $T_{\bar{w}}$).

Kolejną hipotezą statystyczną jest estymacja przedziałowa nieznaney wartości średniej zbiorowości generalnej. Przeprowadzono ją dla dwóch grup przepływomierzy kolanowych, z których pierwszą grupę stanowią przepływomierze $K1 \div K4$ (gdzie $d = 11,2$ mm), a drugą grupę przepływomierze $K5 \div K9$ (gdzie $d = 14,25$ mm). Dla wyznaczenia tej statystyki wzięto pod uwagę wyznaczone wcześniej wartości współczynników proporcjonalności a i wykładników potęgi w . Współczynniki proporcjonalności a zależą głównie od wymiarów geometrycznych zakrzywionego kolana, z tego względu dla każdego przebadanego przepływomierza mają inną wartość, co decyduje o ich nieprzydatności dla zbadania tej hipotezy.

Dlatego estymację przedziałową nieznaney wartości średniej zbiorowości generalnej obliczono dla wykładnika potęgi w , który w równaniach inżynierskich przyjmuje wartość 0,5. Przyjęto do obliczeń statystycznych pierwszą grupę przepływomierzy kolanowych $K1 \div K4$, mając do dyspozycji próbę o liczebności $n = 80$.

Wyznaczono średnią arytmetyczną z próby:

$$\bar{w} = 0,5088$$

Założono, że rozkład współczynnika potęgi \bar{w} ma rozkład zbliżony do normalnego. Następnie wyznaczono odchylenie standardowe z próby (dla $n > 30$) dla pojedynczego pomiaru na podstawie równania:

$$\sigma(w) = \sqrt{\frac{\sum (w_i - \bar{w})^2}{n-1}} = 0,013 \quad (3.36)$$

Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej z próby wyznaczono z równania:

$$\sigma(\bar{w}) = \frac{\sigma(w)}{\sqrt{n}} = 0,0015 \quad (3.37)$$

Korzystając z tablic dystrybuanty rozkładu normalnego dla przyjętego przedziału ufności $1-\alpha = 0,95$ stwierdzono, że $F(z_{\alpha/2}) = 1 - \alpha/2 = 0,975$.

Odczytano wartość zmiennej losowej w rozkładzie $N(0; 1)$ która wyniosła:

$$z_{\alpha/2} = 1,96$$

Dla przyjętego przedziału ufności wyznaczono nieznaną wartość średnią zbiorowości generalnej μ_w przepływomierzy kolanowych z grupy $K1 \div K4$:

$$\mu_w = \bar{w} \pm z_{\alpha/2} \cdot \sigma(\bar{w}) \quad (3.38)$$

Ostatecznie przedział ufności przyjmuje postać:

$$\mu_w = 0,509 \pm 0,003$$

lub

$$0,506 < \mu_w < 0,512$$

W 5 przypadkach na 100, nieznaną wartość średnią zbiorowości generalnej μ_w może znajdować się poza wyznaczonym przedziałem liczbowym.

Dla tej grupy przeprowadzono również test istotności o nieznannej wartości średniej zbiorowości generalnej μ_w . Weryfikacje hipotezy statystycznej przeprowadzono dla statystyki Z o rozkładzie zbliżonym do rozkładu normalnego standaryzowanego, dla której przyjęto wartość średnią zbiorowości generalnej $\mu_{w,0} = 0,5$ (jest to wartość wykładnika potęgi przyjmowana się w równaniach inżynierskich).

Dla tego założenia przyjęto prawo i lewostronny obszar odrzucenia charakteryzujący się tym, że sformułowano:

- hipotezę zerową dla której:

$$H_0 : \mu_w = 0,5$$

- hipotezę alternatywną dla której

$$H_1 : \mu_w > 0,5 \text{ lub } \mu_w < 0,5$$

Sprawdzeniem testu jest statystyka Z o rozkładzie normalnym standaryzowanym określona równaniem:

$$Z = \frac{\bar{w} - \mu_{w0}}{\sigma(\bar{w})} = \frac{0,50878 - 0,5}{0,00146379} = 6,04 \quad (3.39)$$

Przyjęto poziom istotności testu $\alpha = 0,05$ dla którego przedział ufności jest równy $1-\alpha = 0,95$. Ponieważ przy hipotezie alternatywnej dopuszczono odchylenie od wartości μ_w w obu kierunkach, w związku z tym test ten nazwa się dwustronnym. Jego obszar krytyczny obejmuje dwa przedziały, które wyznaczono w tym przypadku dla dystrybuanty $F(z_{\alpha/2}) = 1 - \alpha / 2 = 0,975$

Dla niej, odczytano z tablic rozkładu normalnego wartość krytyczną i wyznaczono obszar krytyczny jako:

$$z_{\alpha/2} > 1,96 \text{ lub } z_{\alpha/2} < -1,96$$

Dla przyjętego w założeniach dwustronnego obszaru odrzucenia, hipotezę H_0 odrzucono, ponieważ statystyka Z należy do obszaru krytycznego $Z > z_{\alpha/2}$ (w wykonanych obliczeniach ten warunek jest spełniony gdyż $6,04 > 1,96$).

Stwierdzono na podstawie porównania statystyki testu dwustronnego z wartością krytyczną, że hipotezę zerową H_0 należy odrzucić przy poziomie istotności testu $\alpha = 0,05$. Prowadzi to do ogólnego stwierdzenia, że w tym przypadku prawdziwa jest hipoteza alternatywna, dla której wartość średnia wykładnika potęgowego ze zbiorowości generalnej $\mu_w \neq 0,5$ dla grupy przepływomierzy kolanowych $K1 \div K4$. Prawdopodobieństwo tego, że niesłusznie odrzuca się hipotezę zerową wynosi 0,05.

Podobnie postąpiono z drugą grupą przepływomierzy kolanowych $K5 \div K9$. W tym przypadku do obliczeń statystycznych dysponowano próbą o większej liczebności, która wynosiła $n = 100$.

W pierwszej kolejności wyznaczono średnią arytmetyczną z próby:

$$\bar{w} = 0,5080$$

Założono, że rozkład współczynnika potęgi \bar{w} ma rozkład zbliżony do normalnego. Następnie wyznaczono odchylenie standardowe z próby ($n > 30$) na podstawie równania:

$$\sigma(w) = \sqrt{\frac{\sum (w_i - \bar{w})^2}{n-1}} = 0,014 \quad (3.40)$$

Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej z próby wyznaczono z równania:

$$\sigma(\bar{w}) = \frac{\sigma(w)}{\sqrt{n}} = 0,0014 \quad (3.41)$$

Dla przyjętego przedziału ufności $1-\alpha = 0,95$ wiadomo, że $F(z_{\alpha/2}) = 1 - \alpha/2 = 0,975$. Korzystając z tej wartości, z tablic dystrybuanty rozkładu normalnego, odczytano wartość zmiennej losowej w rozkładzie $N(0; 1)$ która dla tego przypadku wynosi:

$$z_{\alpha/2} = 1,96$$

Na podstawie tych wartości w przyjętym przedziale ufności wyznaczono nieznaną wartość średnią ze zbiorowości generalnej μ_w korzystając z równania:

$$\mu_w = \bar{w} \pm z_{\alpha/2} \cdot \sigma(\bar{w}) \quad (3.42)$$

Ostatecznie przedział ufności przyjmuje postać:

$$\mu_w = 0,508 \pm 0,003$$

lub

$$0,505 < \mu_w < 0,511$$

W 5 przypadkach na 100, nieznaną wartość średnią ze zbiorowości generalnej μ_w z grupy przepływomierzy kolanowych $K5 \div K9$ może znajdować się poza wyznaczonym przedziałem liczbowym.

Dla tej grupy przeprowadzono również test istotności o nieznannej wartości średniej zbiorowości generalnej μ_w podobnie jak dla grupy pierwszej. Weryfikację hipotezy statystycznej przeprowadzono dla statystyki Z o rozkładzie zbliżonym do rozkładu normalnego standaryzowanego, dla której przyjęto wartość średnią zbiorowości generalnej $\mu_{w0} = 0,5$.

Dla tego założenia przyjęto prawo i lewostronny obszar odrzucenia charakteryzujący się tym, że sformułowano:

- hipotezę zerową dla której:

$$H_0 : \mu_w = 0,5$$

- hipotezę alternatywną dla której

$$H_1 : \mu_w > 0,5 \text{ lub } \mu_w < 0,5$$

Sprawdzeniem testu jest statystyka Z o rozkładzie normalnym standaryzowanym określona równaniem:

$$Z = \frac{\bar{w} - \mu_{w0}}{\sigma(\bar{w})} = \frac{0,508007 - 0,5}{0,0013542184} = 5,91 \quad (3.43)$$

Ponieważ przy hipotezie alternatywnej dopuszczono odchylenie od wartości μ_w w obu kierunkach, w związku z tym test ten nazwano dwustronnym. Jego obszar krytyczny obejmuje dwa przedziały, które wyznaczono w tym przypadku dla dystrybuanty $F(z_{\alpha/2}) = 1 - \alpha/2 = 975$.

Dla niej odczytano wartość krytyczną z_α z tablic rozkładu normalnego dla poziomu istotności testu $\alpha = 0,05$ i określono obszar krytyczny jako:

$$z_{\alpha/2} > 1,96 \text{ lub } z_{\alpha/2} < -1,96$$

Dla przyjętego w założeniach obustronnego obszaru odrzucenia, hipotezę H_0 odrzucono, ponieważ statystyka Z należy do obszaru krytycznego, $Z > z_{\alpha/2}$ (w wykonanych obliczeniach ten warunek jest spełniony gdyż $5,91 > 1,96$).

Na podstawie porównania statystyki testu dwustronnego z wartością krytyczną stwierdzono, że hipotezę zerową H_0 należy odrzucić przy poziomie istotności testu $\alpha = 0,05$. Prowadzi to do ogólnego stwierdzenia, że w tym przypadku prawdziwa jest hipoteza alternatywna, dla której wartość średnia wykładnika potęgowego ze zbiorowości generalnej $\mu_w \neq 0,5$ dla przebadanej grupy przepływomierzy kolanowych K5÷K9. Prawdopodobieństwo tego, że niesłusznie odrzucono hipotezę zerową wynosi 0,05.

Wnioskiem końcowym z przeprowadzonych analiz, jest uwaga, że dla badanych kolan, przyjęcie stałej wartości wykładnika $w = 0,5$ prowadzi do powstania istotnego statystycznego błędu pomiaru. Zatem, aby zmniejszyć niepewność pomiaru przepływomierzem kolanowym należy w trakcie jego wzorcowania przyjąć wykładnik potęgi wyznaczony metodą najmniejszych kwadratów.

3.6. Eksperymentalne określenie miejscowych strat ciśnienia w badanych przepływomierzach kolanowych

Podczas przepływu cieczy rzeczywistej w przewodach prostoliniowych powstają opory przepływu spowodowane lepkością cieczy. Na pokonanie tych oporów zużywana jest pewna część energii płynącej strugi, którą nazwano stratami hydraulicznymi ponieważ ulega rozproszeniu głównie w postaci wydzielonego w czasie przepływu ciepła. Straty te podzielono na straty liniowe i straty miejscowe (lokalne) występujące w tych miejscach przewodu, gdzie powstają zaburzenia w normalnym rozkładzie profilu prędkości [23, 25]. Podczas przepływu płynu w zakrzywionych przewodach kolanowych występują deformacje profilu prędkości związane między innymi z oporami tarcia na ściankach i działaniem sił bezwładności. Straty wywołane tarcie cieczy o ścianki w połączeniu ze zmianą kierunku przepływu prowadzą do oderwania strugi od ścianki przewodu w warstwie przyściennej i sprzyjają tworzeniu wirów na wewnętrznym i zewnętrznym promieniu krzywizny wzdłuż płynącej strugi. Natomiast odśrodkowa siła bezwładności w przekroju poprzecznym na dwusiecznej kąta zagięcia kolana powoduje wytworzenie poprzecznego wiru podwójnego zwiększającego dodatkowo straty przepływu. W pewnej odległości za kolanem struga odzyskuje stabilność. Intensywność występujących zjawisk w przepływomierzach kolanowych zależy głównie od średnicy wewnętrznej kanału osiowosymetrycznego z którego wykonano badane kolano, średniego promienia gięcia kolana, chropowatości ścian kolana i liczby Reynoldsa uwzględniającej siły bezwładności i lepkość płynącej cieczy.

$$\text{Re} = \frac{\varrho \cdot d}{\nu} \quad (3.44)$$

gdzie:

ϱ - średnia wartość prędkości strumienia w przekroju poprzecznym kanału,

d - średnica wewnętrzna przekroju poprzecznego kanału,

ν - kinematyczny współczynnik lepkości cieczy.

W celu wyznaczenia miejscowych strat ciśnienia wykonano dziewięć przepływomierzy kolanowych według rys.3.3.1 z kalibrowanych rur ze stali nierdzewnej, które następnie oznaczono jako $K1 \div K9$, a ich parametry geometryczne przedstawiono w tabeli 3.6.1.

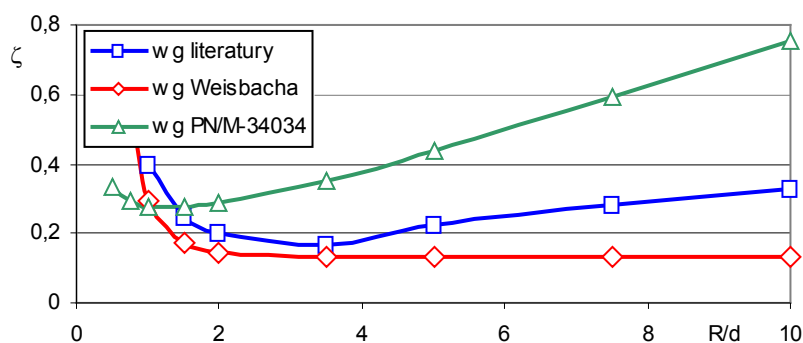
Ze względu na długości odcinków prostych L służących do stabilizacji przepływu przed i za kolanem, odmienne geometrie badanych kolan, zaburzenia występujące przy

przepływie cieczy są zróżnicowane. Stanowią one źródło przyjmowanych zastępczych strat miejscowych w badanych przepływomierzach kolanowych jako całości.

Tabela 3.6.1. Parametry geometryczne badanych przepływomierzy

Oznaczenie przepływomierza	Średnica przekroju poprzecznego kolana d [mm]	Odcinki proste L [mm]	Względny promień R/d
$K1$	11,20	150	1,70
$K2$	11,20	150	2,30
$K3$	11,20	150	3,53
$K4$	11,20	150	5,93
$K5$	14,25	200	2,30
$K6$	14,25	200	2,74
$K7$	14,25	200	2,96
$K8$	14,25	200	5,74
$K9$	14,25	200	11,53

Na rys. 3.6.1. przedstawiono w postaci wykresu zależność współczynnika strat miejscowych ζ od względnego promienia gięcia R/d przy przepływie przez kolana 90° . Przedstawione krzywe reprezentujące wartości współczynnika oporów miejscowych ζ zaczerpnięto z literatury (krzywa wg literatury) [12], obliczono z równania Weisbacha i równań z PN/M034034 [23].



Rys. 3.6.1. Zależność współczynnika ζ od R/d przy przepływie przez kolano 90°

Przedstawione w literaturze i stosowane w obliczeniach hydraulicznych równania, wg których oblicza się wartości współczynnika oporów miejscowych ζ , nie uwzględniają ani zmian rozkładów prędkości ani ciśnienia, a tym samym zaburzeń przepływu w kolanie. Mimo to, tak obliczone wartości współczynnika oporów miejscowych podawane są w

literaturze i stosowane w obliczeniach inżynierskich. W związku z tym postanowiono doświadczalnie wyznaczyć rzeczywiste wartości zastępczych współczynników oporów miejscowych ζ dla badanych przepływomierzy kolanowych. Zależności te zależą od charakterystycznych parametrów geometrycznych przepływomierzy jak: d , R , L i hydrodynamicznych warunków przepływu, które charakteryzuje liczba Reynoldsa [24]. Kolana w badanych przepływomierzach charakteryzują się cechami odmiennymi od tradycyjnych stosowanych w układach hydrauliki wodnej. Są wykonywane z rur ze stali nierdzewnej jako elementy instalacji zasilania paliwem silników lotniczych. Do najważniejszych cech, które również należy uwzględnić, zaliczamy chropowatość powierzchni kanału osiowosymetrycznego przez który przepływa ciecz oraz geometrię wykonania samego kolana jako przepływomierza, które to cechy decydują o hydrodynamicie przepływu. Powoduje to potrzebę weryfikacji przyjmowanych do obliczeń inżynierskich, wartości współczynników oporów miejscowych w oparciu o normy, w których jest podawana na ogół jedna wartość współczynnika strat miejscowych ζ dla poszczególnych kolan i łuków giętych w zależności od średnicy nominalnej przekroju poprzecznego, średniego promienia gięcia i chropowatości powierzchni wewnątrz kanału.

Podstawowa metoda określania wartości współczynnika oporów miejscowych polega na pomiarze różnicy ciśnień (przy zadanym strumieniu objętości) przed i za przepływomierzem (przeszkodą) między przekrojami blisko położonymi względem siebie, tak aby można było pominąć straty liniowe. Wówczas, podobnie jak w rozważaniach teoretycznych, pojawia się problem zaburzenia rozkładu prędkości wywołanego oddziaływaniem bezwładności przy przepływie cieczy przez kolano. Eliminacja takiego zaburzenia wymusza zatem umieszczenie przekrojów pomiarowych w tak dużych odległościach przed i za kolaniem, aby profile prędkości były już w pełni uformowane (rys.3.3.1). Takie założenie wprowadza obok oporów miejscowych, dodatkowe opory liniowe, które w przepływomierzu kolanowym jako całości, zastępuje się zastępczym współczynnikiem oporów miejscowych dla całego przepływomierza.

W celu wyznaczenia rzeczywistych wartości zastępczych współczynników oporów miejscowych ζ badanych przepływomierzy kolanowych, wykorzystano stanowisko pomiarowe (rys. 3.1.1 i rys. 3.1.2), na którym przeprowadzono przepływowe badania hydrauliczne. Mierzono strumień masy przepływającej przez układ pomiarowy cieczy (wody) q_m metodą wagową oraz stratę ciśnienia Δp_s (w punktach odległych o L od końca i początku zakrzywienia) na przepływomierzu kolanowym jako całości przetwornikiem

różnicy ciśnień. Do obliczenia zastępczego współczynnika strat miejscowych przepływomierza kolanowego wykorzystano równanie [25]:

$$\zeta = \frac{\pi^2 \cdot d^4 \cdot \rho \cdot \Delta p_s}{8 \cdot q_m^2} \quad (3.45)$$

gdzie:

d - średnica wewnętrzna przekroju poprzecznego kanału osiowosymetrycznego,

ρ - gęstość przepływającej cieczy,

Δp_s - strata ciśnienia na przepływomierzu kolanowym,

q_m - strumień masy przepływającej cieczy.

W czasie badań hydraulicznych postanowiono sprawdzić, dla wybranego układu przepływomierza kolanowego *K5*, jaki wpływ na wartość zastępczego współczynnika strat miejscowych ζ , mają otwory poboru ciśnienia (piezometryczne) znajdujące się na zewnętrznym i wewnętrznym łuku kolana.

Dlatego w pierwszej kolejności przebadano układ przepływowy przepływomierza z kolaniem *K5* bez wykonanych otworów piezometrycznych, którego widok przedstawiono na rys. 3.6.2.



Rys. 3.6.2. Widok układu kolana przepływomierza *K5* bez otworów piezometrycznych

Następnie w kolanie *K5* wykonano dwa otwory (o średnicy 1,5 mm) piezometryczne na dwusiecznej kąta zagięcia, po jednym na zewnętrznym i wewnętrznym łuku gięcia jak w typowym przepływomierzu kolanowym do zastosowań przemysłowych. Widok tak wykonanego układu pomiarowego przepływomierza kolanowego przedstawiono na rys. 3.6.3.



Rys. 3.6.3. Widok układu kolana przepływomierza $K5$ z dwoma otworami piezometrycznymi

Na rys. 3.6.4 przedstawiono widok układu pomiarowego przepływomierza kolanowego $K5$, w którym otwory poboru ciśnienia (o średnicy 1,5 mm) wykonano zgodnie z rys. 3.3.3, przy czym na wewnętrznym łuku kolana wykonano pięć otworów, a na zewnętrznym dziewięć otworów piezometrycznych.



Rys. 3.6.4. Widok układu kolana przepływomierza $K5$ z otworami piezometrycznymi

Dla tych trzech przedstawionych układów pomiarowych przepływomierza kolanowego z kolaniem $K5$ wykonano badania doświadczalne. Pomiary przeprowadzono przy przepływie wody dla liczb Reynoldsa o wartości $Re \sim 19700$ i $Re \sim 33400$ wyznaczając wielkości zastępczego współczynnika strat miejscowych ζ .

Uśrednione wyniki końcowe (Re , θ , ζ) dla wybranego przepływomierza kolanowego $K5$ z przeprowadzonych pomiarów i obliczeń przedstawiono w tabeli 3.6.2.

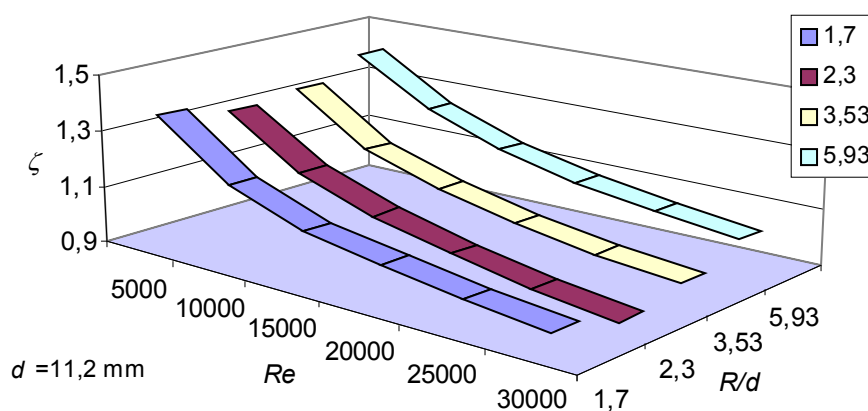
Tabela 3.6.2. Wpływ otworów piezometrycznych na wyznaczoną wartość uśrednionego zastępczego współczynnika strat miejscowych ζ

Układ pomiarowy z:	g [m/s]	Re	ζ
Rys. 3.6.2	1,408	19608	0,740
	2,401	33424	0,624
Rys. 3.6.3	1,417	19725	0,743
	2,401	33425	0,627
Rys. 3.6.4	1,417	19726	0,762
	2,390	33271	0,639

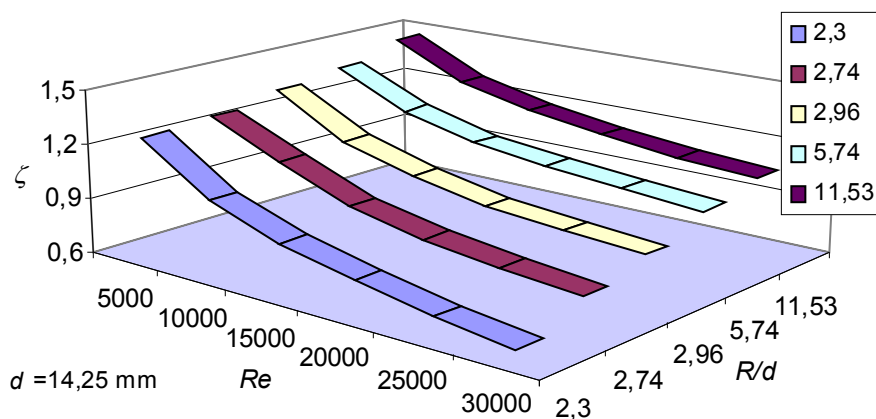
Z przeprowadzonych pomiarów i obliczeń wynika, że dla wybranego przepływomierza kolanowego $K5$, wartość zastępczego współczynnika strat miejscowych ζ wzrasta o ok. 0,5% (w przypadku wykonania tylko dwóch otworów piezometrycznych zgodnie z rys. 3.6.3) w stosunku do kolana bez wykonanych otworów piezometrycznych dla przebadanych przepływów określonych liczbą $Re \sim 19700$ i $Re \sim 33400$.

Dla przepływomierza $K5$ z większą ilością otworów poboru ciśnienia, wykonanego zgodnie z rys. 3.3.3, wartość zastępczego współczynnika strat miejscowych ζ wzrasta od ok. 2% przy liczby $Re \sim 33400$ do 2,5% przy liczby $Re \sim 19700$ w stosunku do kolana bez wykonanych otworów piezometrycznych.

Wyniki obliczeń zależności zastępczego współczynnika strat miejscowych ζ , dla przebadanych przepływomierzy kolanowych wg rys. 3.3.3 od względnego promienia gięcia R/d i liczby Reynoldsa przedstawiono w postaci wykresów (rys. 3.6.5, rys. 3.6.6) $\zeta = f(Re)$, przy przepływającym strumieniu wody.



Rys. 3.6.5. Zależność zastępczego współczynnika ζ od R/d i Re przy przepływie wody przez przepływomierz kolanowy 90° dla kanału o średnicy $d = 11,2$ mm

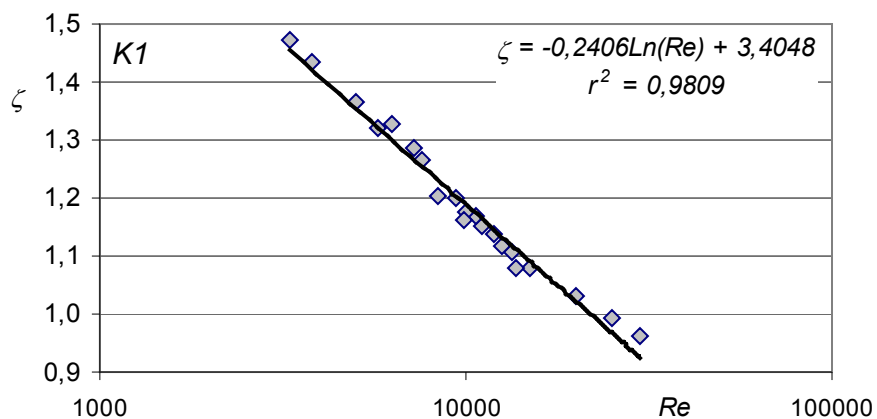


Rys. 3.6.6. Zależność zastępczego współczynnika ζ od R/d i Re przy przepływie wody przez przepływomierz kolanowy 90° dla kanału o średnicy $d=14,25$ mm

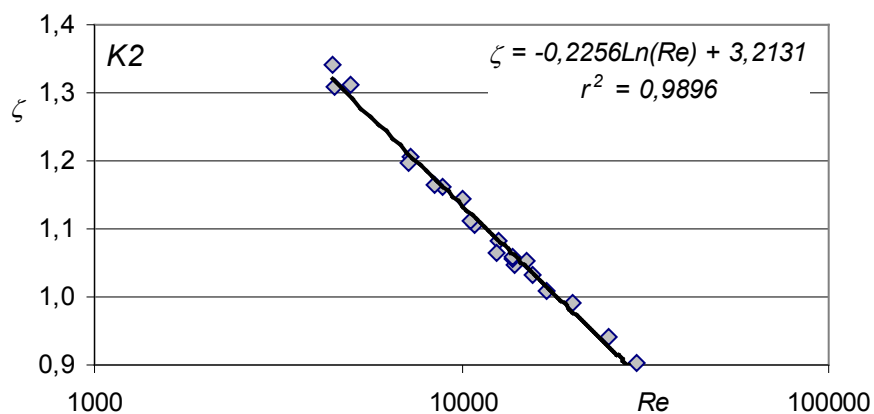
Z wykresów widać, że zastępczy współczynnik oporów miejscowych ζ zmienia się w sposób zbliżony do kształtu przedstawionego w literaturze (rys. 3.6.1.) i przyjmuje najmniejsze wartości dla względnego promienia gięcia z przedziału $2,3 < R/d < 3,0$. Wyniki te otrzymano przy przepływie wody przez badane przepływomierze kolanowe w zakresie liczby Reynoldsa $5000 < Re < 30000$. Mimo tego, wyznaczone wartości zastępczego współczynnika strat miejscowych $\zeta > 0,6$ znacznie przekraczają wartości podawane w literaturze, do stosowania w obliczeniach inżynierskich [23, 25]. Jednak wartości te, są zbieżne z wynikami badań i symulacji przeprowadzonymi przy przepływie wody przez kolana 90° [24]. Wyniki z przeprowadzonych badań zastępczego współczynnika strat miejscowych $\zeta = f(Re)$ przepływomierzy kolanowych (K1 do K9), przedstawiono na wykresach pół-logarytmicznych (rys. 3.6.7 do rys. 3.6.15) w postaci punktów.

Dodatkowo na wykresach przedstawiono wartości zastępczego współczynnika oporów miejscowych ζ wyznaczonego metodą najmniejszych kwadratów w postaci równania typu: $\zeta = -A_p \ln(Re) + B$ i wynikającą z tego równania linię trendu wraz z współczynnikiem determinacji r^2 .

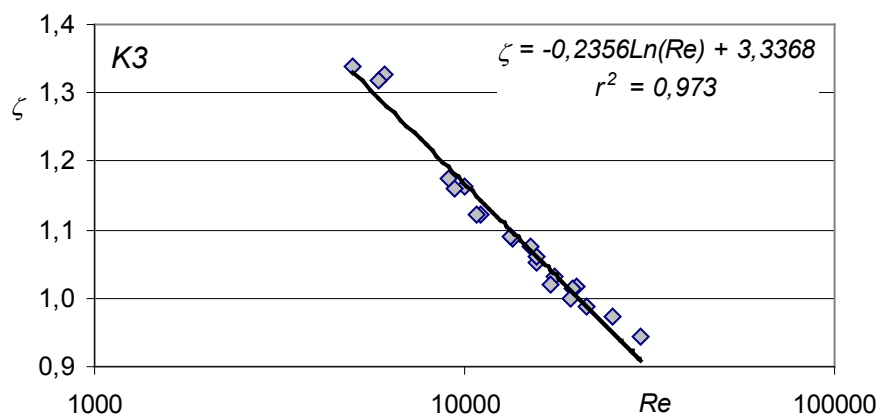
W tabeli 3.6.3. przedstawiono wartości współczynników A_p , B , r^2 równań modeli trendu typu: $\zeta = -A_p \ln(Re) + B$, wyznaczonych indywidualnie dla każdego z przebadanych przepływomierzy kolanowych.



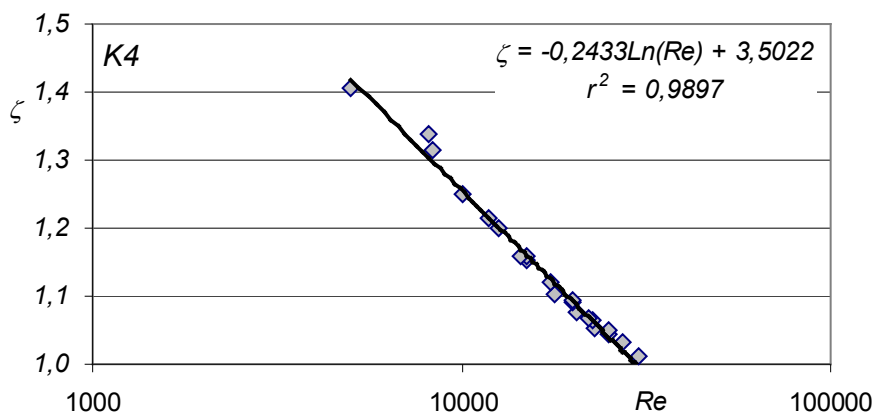
Rys. 3.6.7. Zależność zastępczego współczynnika ζ od liczby Re , przy przepływie przez przepływomierz kolanowy (K1)



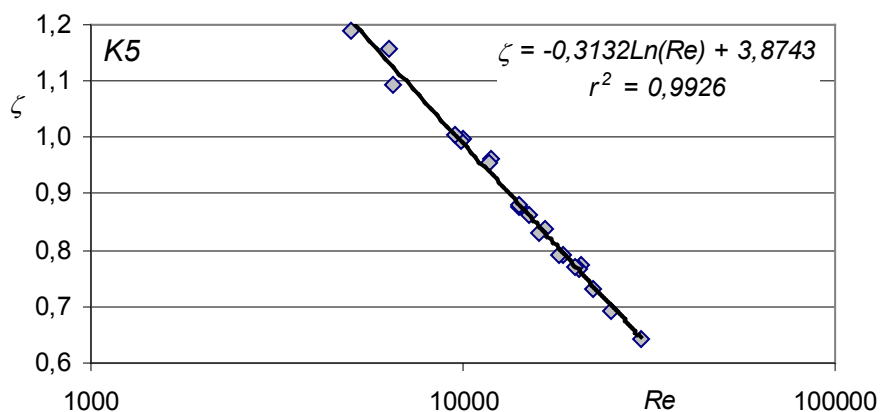
Rys. 3.6.8. Zależność zastępczego współczynnika ζ od liczby Re , przy przepływie przez przepływomierz kolanowy (K2)



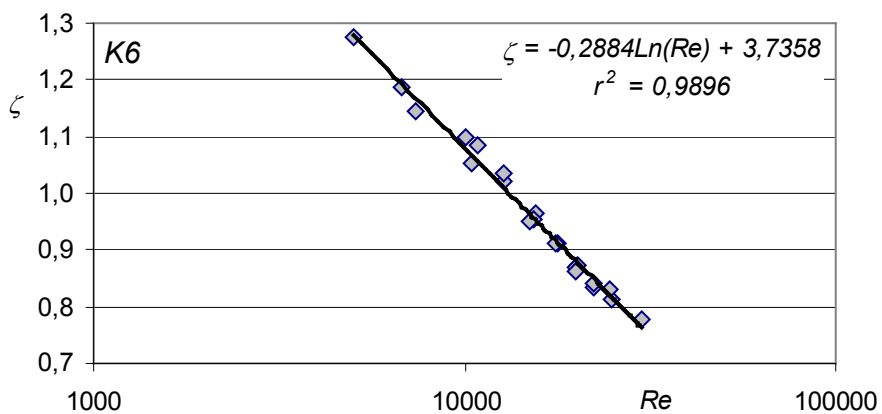
Rys. 3.6.9. Zależność zastępczego współczynnika ζ od liczby Re , przy przepływie przez przepływomierz kolanowy (K3)



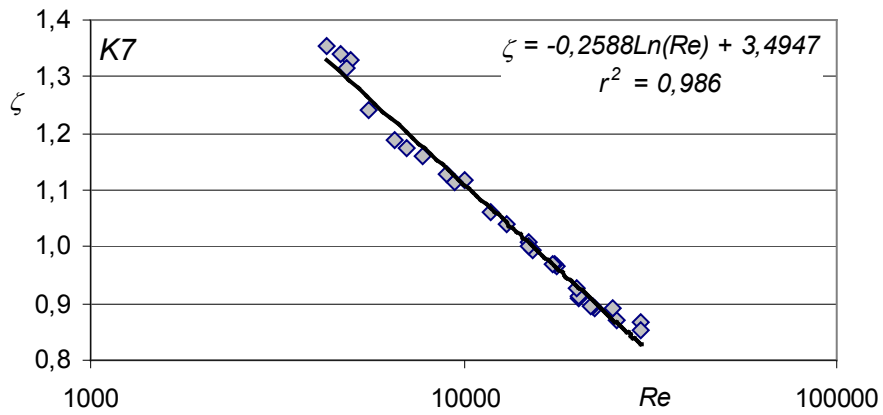
Rys. 3.6.10. Zależność zastępczego współczynnika ζ od liczby Re , przy przepływie przez przepływomierz kolanowy (K4)



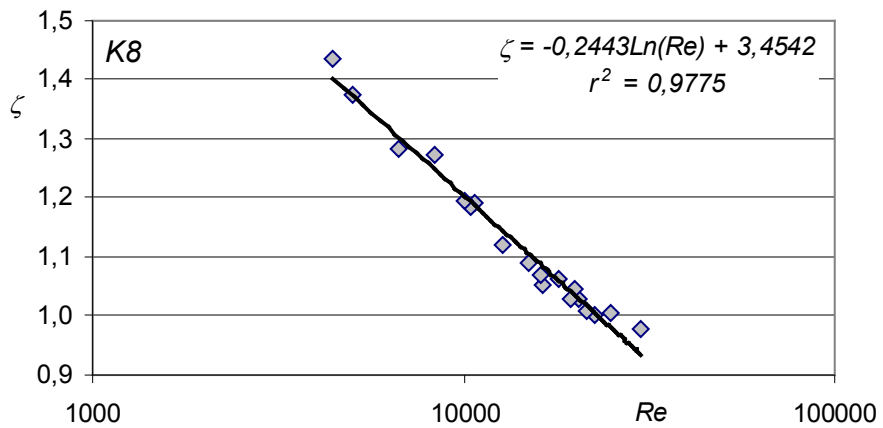
Rys. 3.6.11. Zależność zastępczego współczynnika ζ od liczby Re , przy przepływie przez przepływomierz kolanowy (K5)



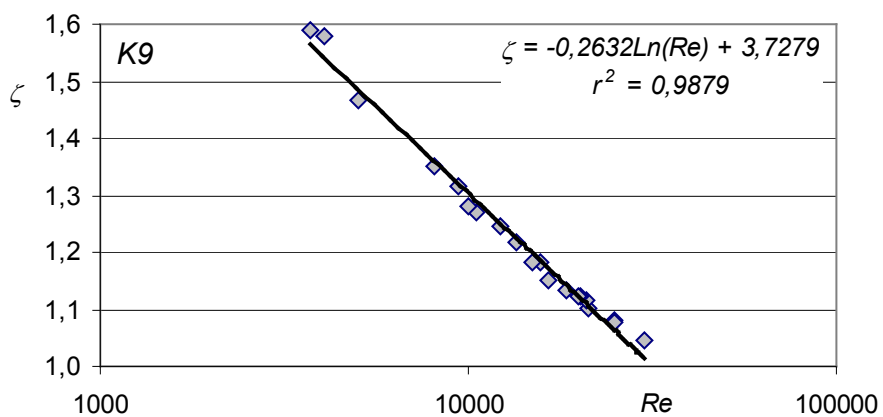
Rys. 3.6.12. Zależność zastępczego współczynnika ζ od liczby Re , przy przepływie przez przepływomierz kolanowy (K6)



Rys. 3.6.13. Zależność zastępczego współczynnika ζ od liczby Re , przy przepływie przez przepływomierz kolanowy (K7)



Rys. 3.6.14. Zależność zastępczego współczynnika ζ od liczby Re , przy przepływie przez przepływomierz kolanowy (K8)



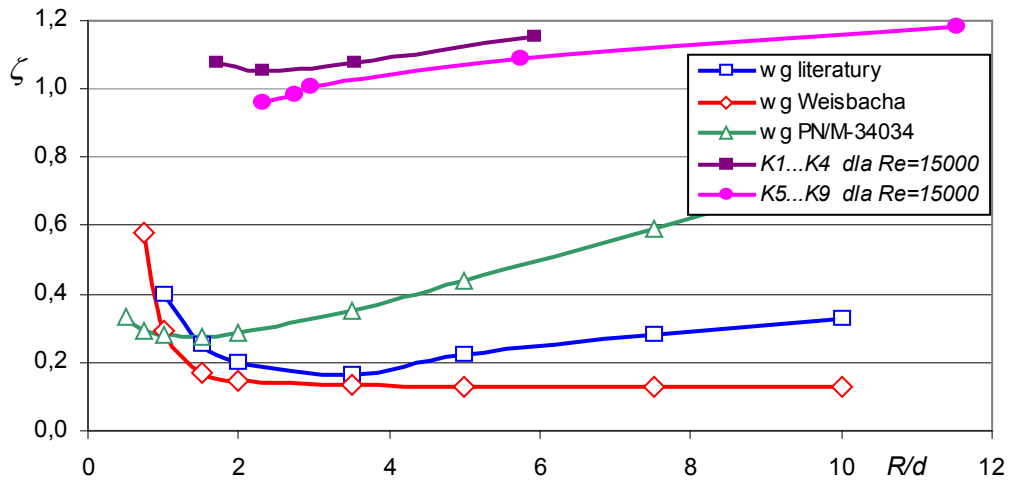
Rys. 3.6.15. Zależność zastępczego współczynnika ζ od liczby Re , przy przepływie przez przepływomierz kolanowy (K9)

Tabela 3.6.3. Wartości współczynników równania $\zeta = -A_p \ln(Re) + B$

Oznaczenie przepływomierza	Współczynnik proporcjonalności A_p	Wyraz wolny B	Współczynnik determinacji r^2
<i>K1</i>	0,2406	3,4048	0,9809
<i>K2</i>	0,2256	3,2131	0,9896
<i>K3</i>	0,2356	3,3368	0,9730
<i>K4</i>	0,2433	3,5022	0,9897
<i>K5</i>	0,3132	3,8743	0,9926
<i>K6</i>	0,2884	3,7358	0,9896
<i>K7</i>	0,2588	3,4947	0,9860
<i>K8</i>	0,2443	3,4542	0,9775
<i>K9</i>	0,2632	3,7279	0,9879

Podsumowując przeprowadzone badania doświadczalne można stwierdzić, że istnieje optymalne, ze względu na minimalizację strat ciśnienia, zakrzywienie przepływomierza kolanowego, które dla przebadanych kolan zawiera się w granicach $2,3 \leq R/d \leq 2,96$. Można również stwierdzić, że zwiększona ilość otworów poboru ciśnienia na łuku wewnętrznym i zewnętrznym (14 otworów) kolana przepływomierza *K5* w stosunku do wykonania standardowego (2 otwory) powoduje wzrost zastępczego współczynnika oporów miejscowych ζ o ok. 2% dla przebadanych przepływów określonych liczbą $Re \sim 19700$ i $Re \sim 33400$.

Na rys. 3.6.16 przedstawiono w postaci wykresów wybrane zależności zastępczego współczynnika strat miejscowych ζ w funkcji względnego promienia gięcia R/d dla badanych przepływomierzy kolanowych *K1*÷*K4* ($d = 11,2$ mm) i *K5*÷*K9* ($d = 14,25$ mm). Przedstawione krzywe uzyskane doświadczalnie przy przepływającym strumieniu wody określonym liczbą $Re = 15000$, nałożono na wykresy z rys. 3.6.1 przedstawiające wartości współczynnika oporów miejscowych ζ dla kolan o kącie zagięcia 90° w zależności od względnego promienia gięcia R/d . Z przedstawionych badań wynika, że zastępczy współczynnik oporów miejscowych ζ badanych przepływomierzy kolanowych (zawierają opory liniowe), jest ok. 2 do 5 razy większy od współczynnika oporów miejscowych ζ dla kolan 90° (podawanych w literaturze) w zależności od przyjętego względnego promienia gięcia R/d .



Rys. 3.6.16. Zależność współczynnika ζ od R/d przy przepływie przez kolano 90° i badane przepływomierze kolanowe dla $Re = 15000$

4. OBLICZENIA NUMERYCZNE WYBRANYCH PRZEPLYWOMIERZY KOLANOWYCH

Aby określić właściwości badanych przepływomierzy kolanowych, rozpatrzono ustalony przepływ płynu lepkiego, nieściśliwego przez przepływowy układ hydrauliczny opisany w rozdziale 3.1. Taki rodzaj przepływu opisano w literaturze przedmiotu [16, 25, 30, 64] równaniami ruchu płynu wywodzącymi się z równania Naviera-Stokesa (N-S) i powiązaniem z nimi równaniem ciągłości strugi. W symulacjach numerycznych opartych o komercyjne oprogramowania wykorzystywane są metody numerycznego poszukiwania rozwiązań tych równań dla tak opisanego przepływu [18, 55, 58].

Dla uzyskania wyników obliczeń symulacji numerycznych wybranych przepływomierzy kolanowych opracowano ich modele geometryczne. Każdy obszar zamodelowanej przestrzeni modelu obliczeniowego wypełniono siatką objętości kontrolnych w programie GAMBIT, który jest dołączony do komercyjnego pakietu oprogramowania FLUENT 6.3 [19], w którym następnie przeprowadzano symulacje. Turbulentne zjawiska przepływu płynu w programie FLUENT opisano układem równań, składającym się z równania (N-S) zachowania pędu płynu lepkiego, równania ciągłości przepływu i dodatkowych równań transportu zależnych od przyjętego modelu obliczeniowego. W równaniach tych przy pominięciu składowych sił ciężkości, wprowadzono uproszczenia zakładające niezmiennosc gęstości i lepkości dynamicznej płynu. Założono również, że chwilowe wartości wielkości fizycznych charakteryzujących przepływ możemy traktować jako sumę wielkości uśrednionych w czasie.

W zapisie wektorowym podstawowy układ równań przedstawiono w następujący sposób [18, 19, 30]:

- równanie ciągłości

$$\nabla \cdot \vec{g} = 0 \quad (4.1)$$

- równanie pędu

$$\rho(\vec{g} \cdot \nabla)\vec{g} = -\nabla p + \mu \cdot \nabla^2 \vec{g} \quad (4.2)$$

gdzie:

\vec{g} - wektor prędkości przepływu

ρ - gęstość płynu

p - ciśnienie

μ - lepkość dynamiczna

∇ - wektorowy operator Hamiltona

∇^2 - operator Laplace'a

Na przykład, do rozwiązania turbulentnego przepływu płynu nieściśliwego opisanego układem równań (4.1 i 4.2) w modelu k - ε , niezbędne są jeszcze dwa dodatkowe równania transportu:

- energii kinetycznej turbulencji – k ,

$$\rho(\bar{g} \cdot \nabla)k = \nabla \frac{\mu_t}{\sigma_k} \cdot \nabla k + \mu_t \cdot G - \rho \cdot \varepsilon \quad (4.3)$$

- szybkości dyssypacji energii kinetycznej turbulencji – ε ,

$$\rho(\bar{g} \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \nabla \varepsilon + c_1 \cdot \mu_t \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot G - c_2 \cdot \rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.4)$$

w których przez G oznaczono dyssypację energii ruchu uśrednionego.

Występującą w tych dodatkowych równaniach, lepkość turbulentną μ_t określa się dla przyjętego standardowego w pełni rozwiniętego turbulentnego modelu k - ε równaniem:

$$\mu_t = \rho \cdot c_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.5)$$

Z podobnych założeń i rozwiązań korzystano w symulacjach numerycznych opartych o oprogramowanie FLUENT 6.3 dla modelu k - ω , charakteryzującego się energią kinetyczną turbulencji k oraz wirowością (częstotliwością turbulencji) ω . W modelowaniu LES symulowanie małych wirów odbywało się przez wprowadzenie dodatkowej lepkości, natomiast duże wiry modelowano w skali porównywalnej z rozmiarami przyjętego oczka siatki.

Celem dostosowania równania Naviera-Stokesa do obliczeń numerycznych dla przyjętych modeli turbulencji k - ε i k - ω wykorzystywano w procesie iteracji numeryczne uśrednianie obliczanych wartości względem czasu, a w symulacji LES przestrzenne uśrednienie pola przepływu. Przy modelowaniu numerycznym przyjęto przestrzenny model trójwymiarowy $3D$, dla przepływu wody. Wybrane symulacje przeprowadzono w oprogramowaniu FLUENT 6.3 dla standardowych współczynników jak i stałych wartości używanych w przyjętych modelach turbulencji k - ε , k - ω oraz w symulacji dużych wirów LES .

Występujące stałe wartości, jak i poszczególne wartości współczynników dla wybranych do obliczeń numerycznych modeli przepływu, wynoszą odpowiednio:

- dla modelu k - ε :

$$c_\mu=0,09; c_1=1,44; c_2=1,92; \sigma_k=1,0; \sigma_\varepsilon=1,3$$

- dla modelu $k-\omega$:

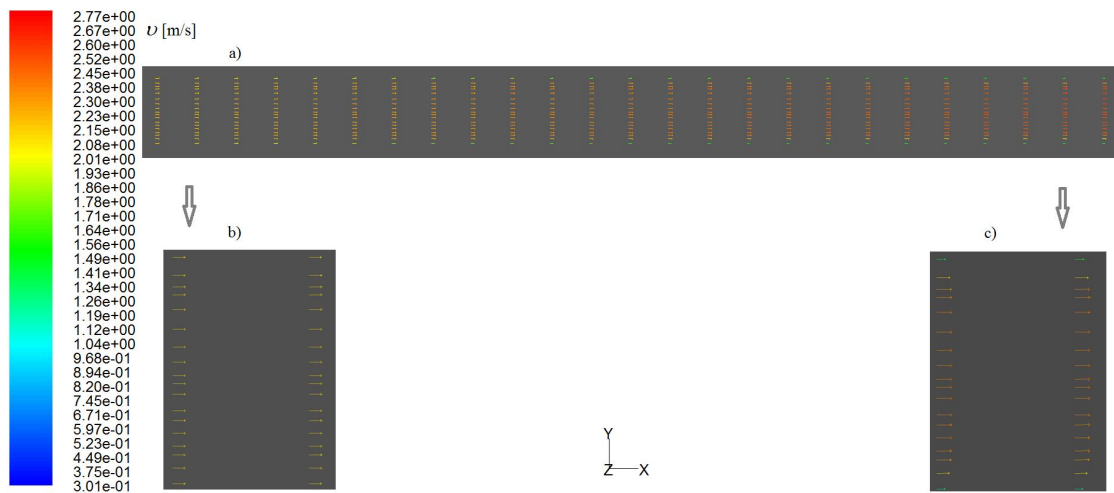
$$\alpha^*=1; \alpha=0,52; \beta^*=0,09; \beta=0,071; R_\beta=8,0; \zeta^*=1,5; M_{10}=0,25; \sigma_k=2,0; \sigma_\omega=2,0$$

- dla modelu LES :

$$c_s=0,1$$

Rozwiązania numeryczne układu równań opisujących bilans masy, energii i wymiany pędu uzyskano dla standardowych modeli: $3D k-\omega$, $3D k-\varepsilon$, $3D LES$, wybranych przepływomierzy kolanowych przy turbulentnym przepływie wody. Ten burzliwy przepływ uzyskano dla liczby Reynoldsa $Re = 30600$ co odpowiada średniej prędkości przepływu wody $U_{sr} = 1,98$ m/s przy warunkach brzegowych określonych wartościami ciśnienia całkowitego i statycznego na wlocie i ciśnienia statycznego na wylocie z przepływomierza kolanowego: $p_c = 12450$ Pa; $p_{wej.} = 10040$ Pa; $p_{wyl.} = 8030$ Pa.

Przykładowe wyniki obliczonych symulacji, dla przepływomierza kolanowego $K6$ w postaci rozkładu prędkości przepływu oraz ciśnień w osiowosymetrycznym kanale przepływowym w płaszczyźnie zagięcia kolana, przedstawiono na rys. 4.1 do rys. 4.4 dla przyjętego modelu $3D LES$ przy liczbie $Re = 30600$.

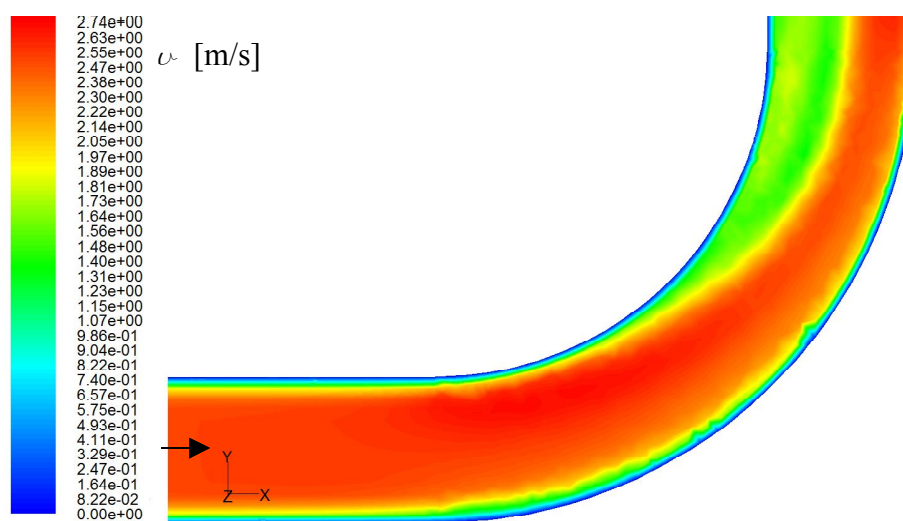


Rys. 4.1. Rozkład wektorów prędkości płynu w przekroju osiowym dla $Re = 30600$

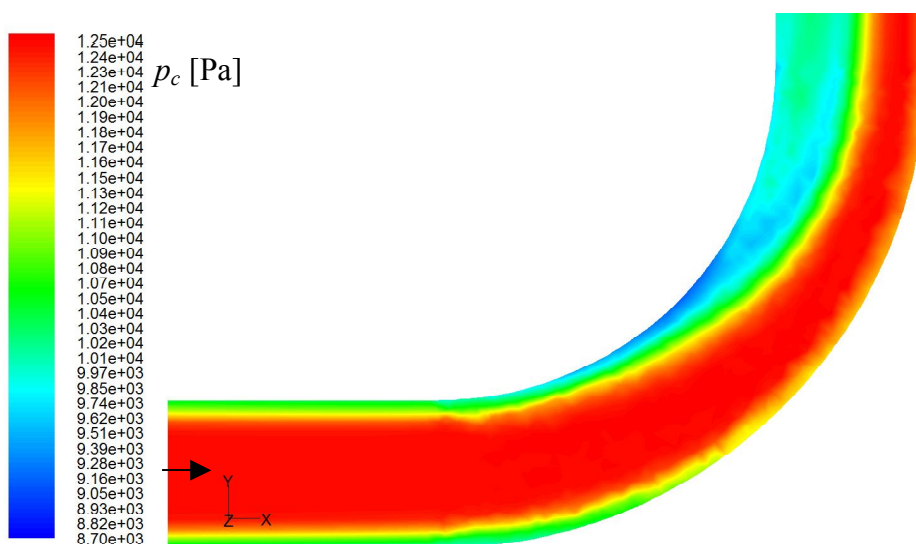
Na rys. 4.1.a przedstawiono rozkład wektorów prędkości dla odcinka prostującego przepływ ($Re = 30600$) w przepływomierzu kolanowym $K6$ przy jego tłokowym wymuszeniu. W początkowej, wlotowej części kanału przepływomierza (rys. 4.1.b), wszystkie wektory prędkości mają jednakową wartość. W miarę przemieszczania się cieczy wzdłuż kanału, prędkość przepływu w strefie przyściennej ulega zmniejszeniu (na

ściance prędkość przepływu jest równa zero), a w osi kanału ulega niewielkiemu zwiększeniu przyjmując turbulentny profil rozkładu prędkości (rys. 4.1.c).

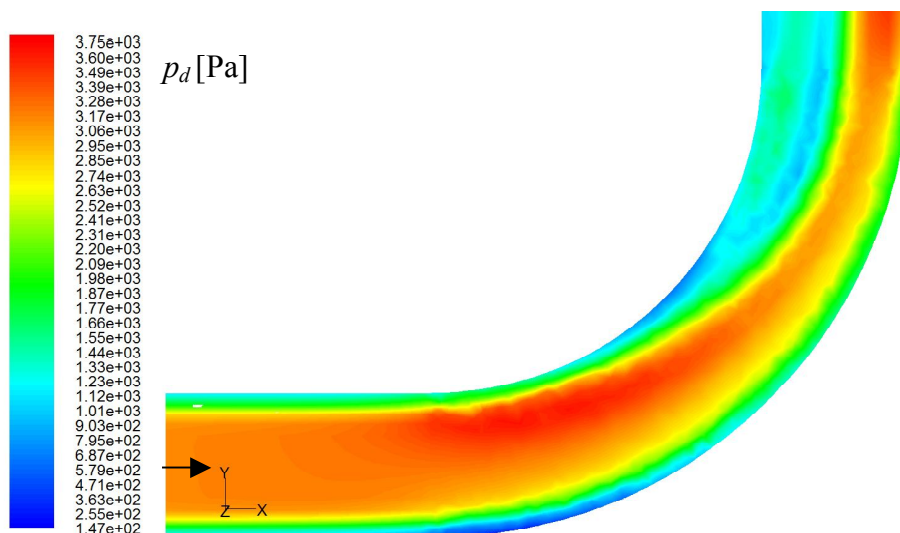
Na rys. 4.2 przedstawiono przykładowy rozkład prędkości wody w przekroju osiowym w płaszczyźnie przekroju wzdłużnego kolana, gdzie zaobserwowano maksymalną prędkość w pobliżu ścianki wewnętrznej na początku zakrzywienia kolana, która w dalszej części przepływu strumienia (siła odśrodkowa) osiąga swoje maksymalne wartości w pobliżu ścianki łuku zewnętrznego przy końcu jego zakrzywienia.



Rys. 4.2. Rozkład prędkości w strudze płynu w osiowym przekroju kolana przepływomierza K6 dla $Re = 30600$



Rys. 4.3. Rozkład ciśnienia całkowitego w osiowym przekroju przepływomierza K6 dla $Re = 30600$



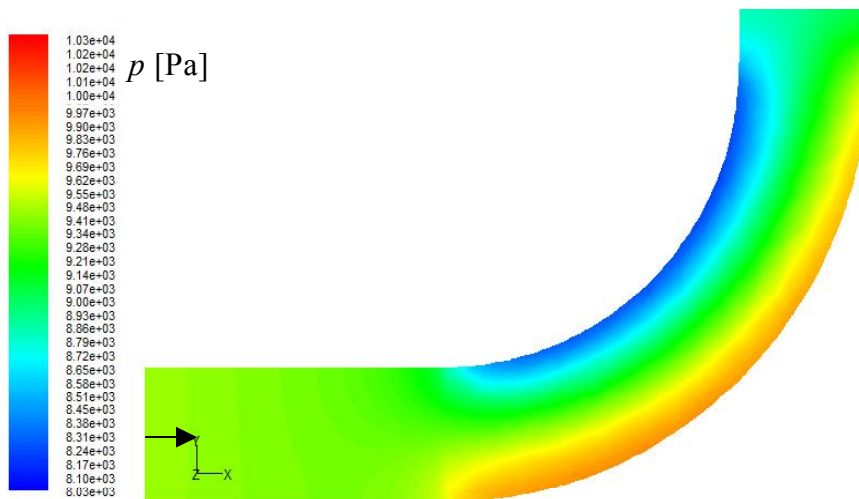
Rys. 4.4. Rozkład ciśnienia dynamicznego w osiowym przekroju przepływomierza *K6* dla $Re = 30600$

Na rys. 4.3 przedstawiono rozkład ciśnienia całkowitego (sumy ciśnienia statycznego i dynamicznego) w przekroju osiowym w płaszczyźnie zagięcia kolana *K6* przy przepływie ($Re = 30600$) wody. Uzyskane wyniki symulacji pozwalają na określenie występowania podczas przepływu płynu obszarów o największym i najmniejszym ciśnieniu całkowitym. Najmniejsze ciśnienie całkowite występuje w pobliżu ścianki łuku wewnętrznego w obszarze zawartym między początkiem zagięcia kolana, a dwusieczną jego kąta. Natomiast największe ciśnienie całkowite występuje w pobliżu ścianki łuku zewnętrznego w obszarze między dwusieczną kąta zagięcia, a końcem gięcia kolana.

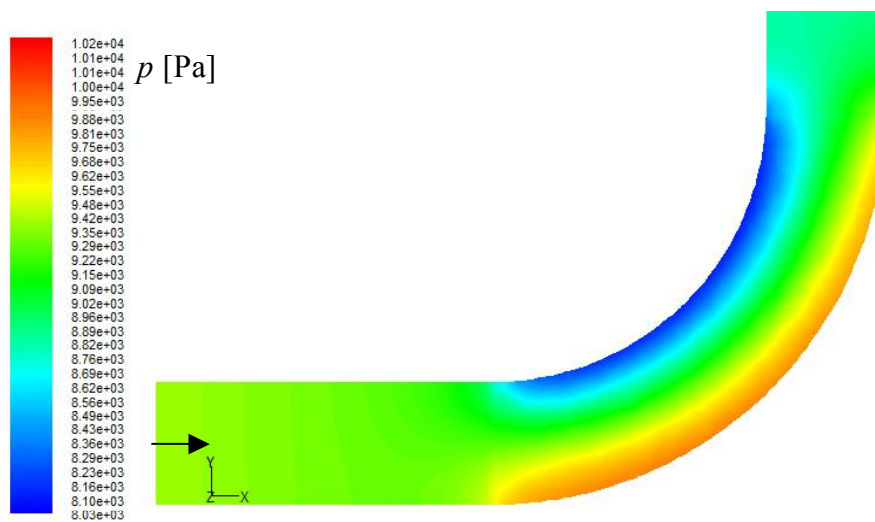
Na rys. 4.4 przedstawiono rozkład ciśnienia dynamicznego w środkowej płaszczyźnie przekroju wzdłużnego kolana *K6* dla warunków początkowych przepływu wody określonych liczbą Reynoldsa $Re = 30600$.

Na rysunkach od rys.4.5 do rys. 4.13 przedstawiono wyznaczone numerycznie dla wybranych modeli symulacji (*3D k- ω* , *3D k- ϵ* , *3D LES*), rozkłady ciśnienia statycznego w przekroju osiowym w płaszczyźnie przekroju wzdłużnego kolana *K6* przy przepływie wody.

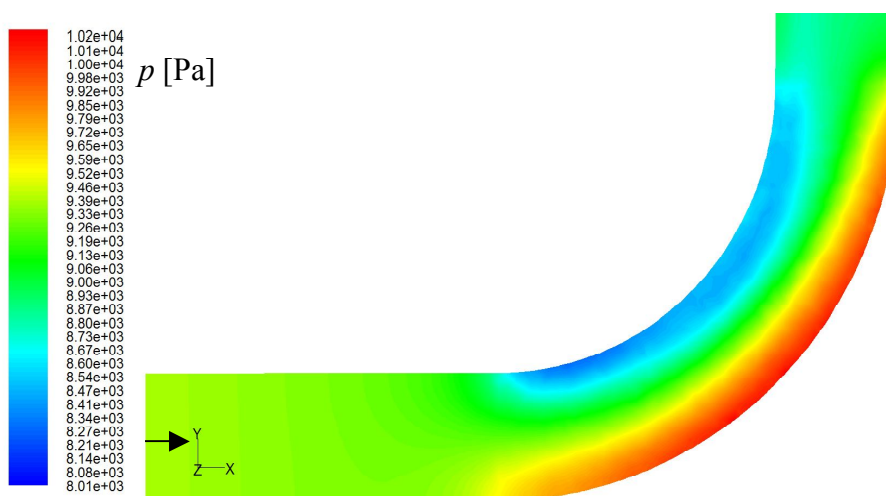
Obliczenia wykonano dla przepływu wody przy liczbie Reynoldsa $Re = 30600$ dla warunków brzegowych określonych wartościami ciśnienia: całkowitego i statycznego na wlocie ($p_c = 12450$ Pa, $p_{wej.} = 10040$ Pa) i statycznego na wylocie ($p_{wyj.} = 8030$ Pa) za przepływomierzem kolanowym.



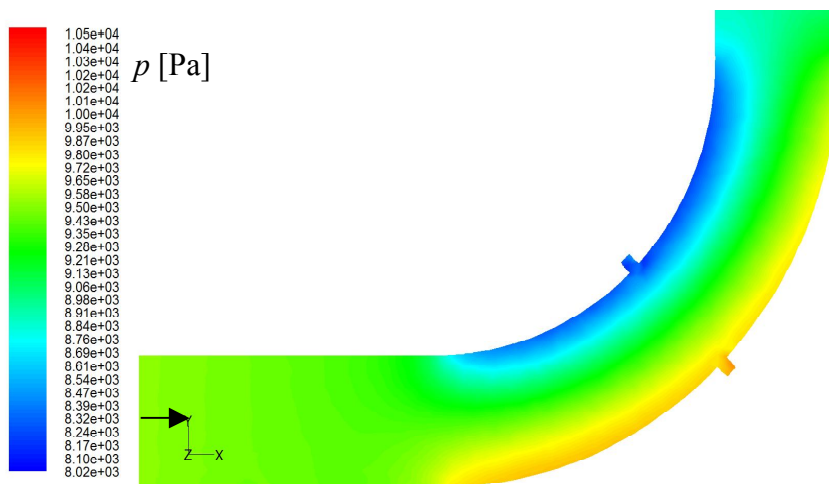
Rys. 4.5. Rozkład ciśnienia statycznego dla modelu $3D$ $k-\omega$ (dla kolana $K6$ przy $Re = 30600$)



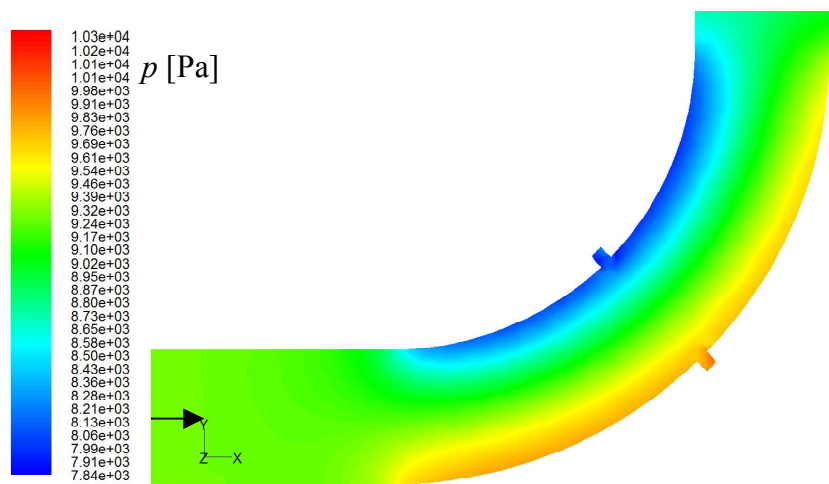
Rys. 4.6. Rozkład ciśnienia statycznego dla modelu $3D$ $k-\epsilon$ (dla kolana $K6$ przy $Re = 30600$)



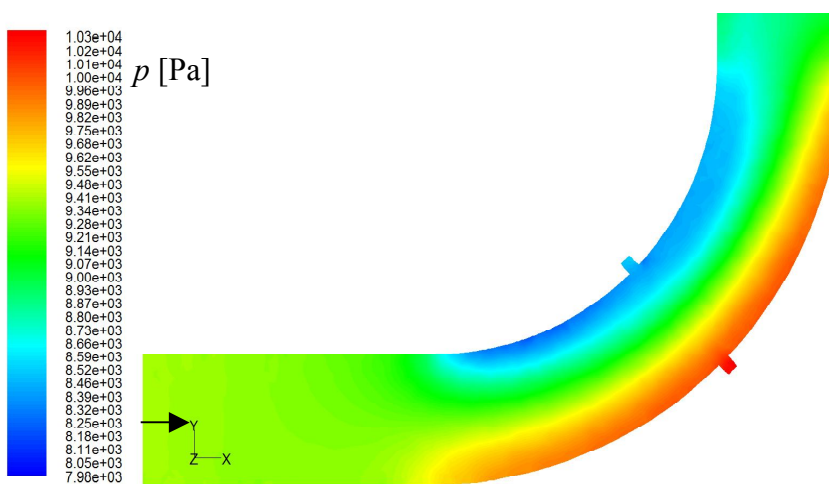
Rys. 4.7. Rozkład ciśnienia statycznego dla modelu $3D$ LES (dla kolana $K6$ przy $Re = 30600$)



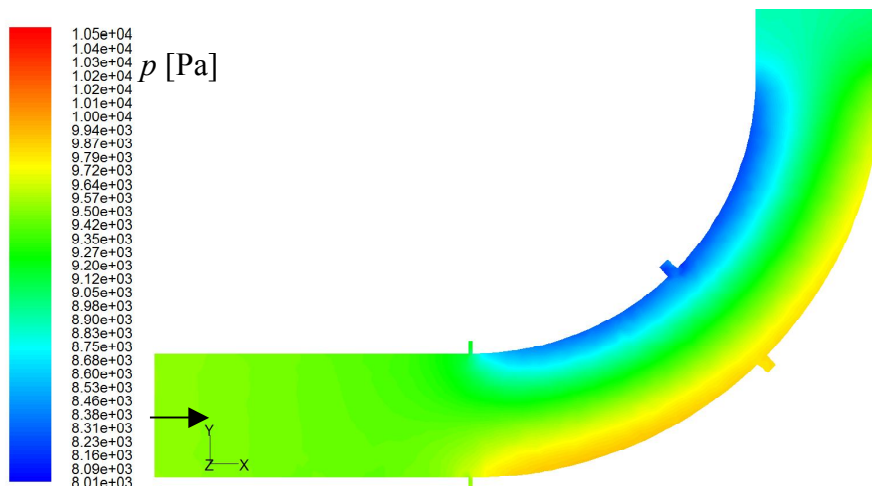
Rys. 4.8. Rozkład ciśnienia statycznego dla modelu $3D$ $k-\omega$ (dla kolana $K6$ z 2 otworami przy $Re = 30600$)



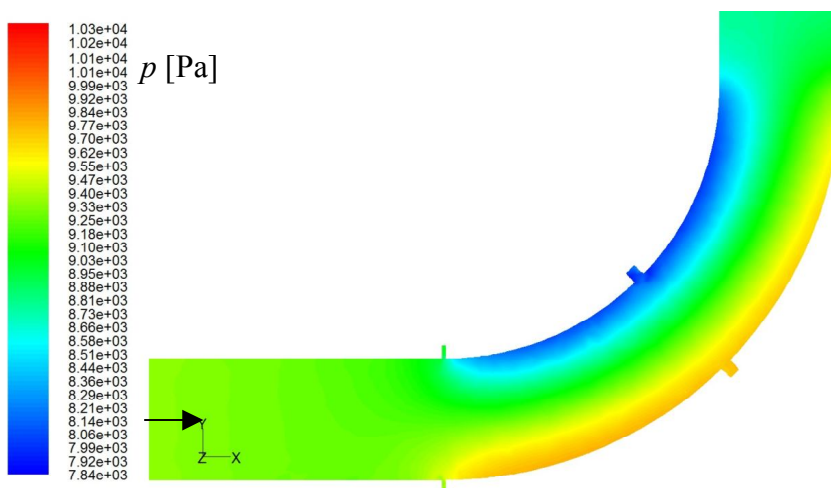
Rys. 4.9. Rozkład ciśnienia statycznego dla modelu $3D$ $k-\epsilon$ (dla kolana $K6$ z 2 otworami przy $Re = 30600$)



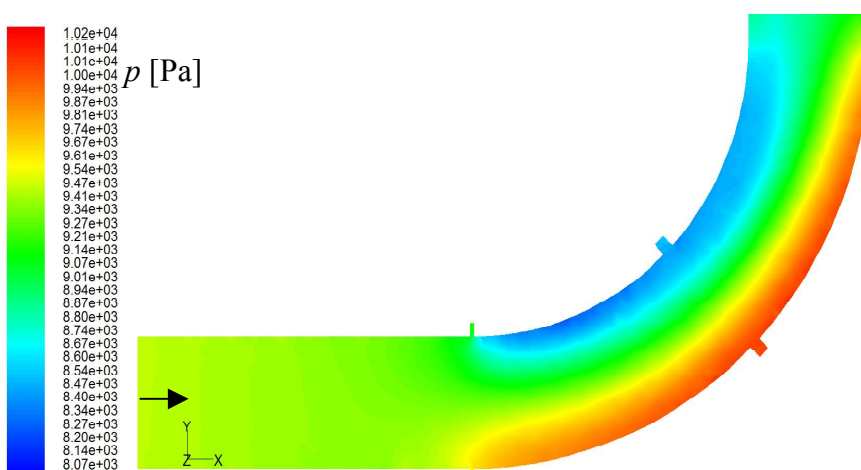
Rys. 4.10. Rozkład ciśnienia statycznego dla modelu $3D$ LES (dla kolana $K6$ z 2 otworami przy $Re = 30600$)



Rys. 4.11. Rozkład ciśnienia statycznego dla modelu 3D $k-\omega$ (dla kolana K6 z 2 otworami i zaburzeniem na wejściu przy $Re = 30600$)



Rys. 4.12. Rozkład ciśnienia statycznego dla modelu 3D $k-\epsilon$ (dla kolana K6 z 2 otworami i zaburzeniem na wejściu przy $Re = 30600$)



Rys. 4.13. Rozkład ciśnienia statycznego dla modelu 3D LES (dla kolana K6 z 2 otworami i zaburzeniem na wejściu przy $Re = 30600$)

Na rysunkach 4.5 do rysunku 4.7 przedstawiono wyznaczony numerycznie w oprogramowaniu FLUENT 6.3 rozkład ciśnienia statycznego dla przepływomierza kolanowego *K6* w którym kolano pomiarowe jest bez otworów impulsowych poboru ciśnienia spiętrzenia.

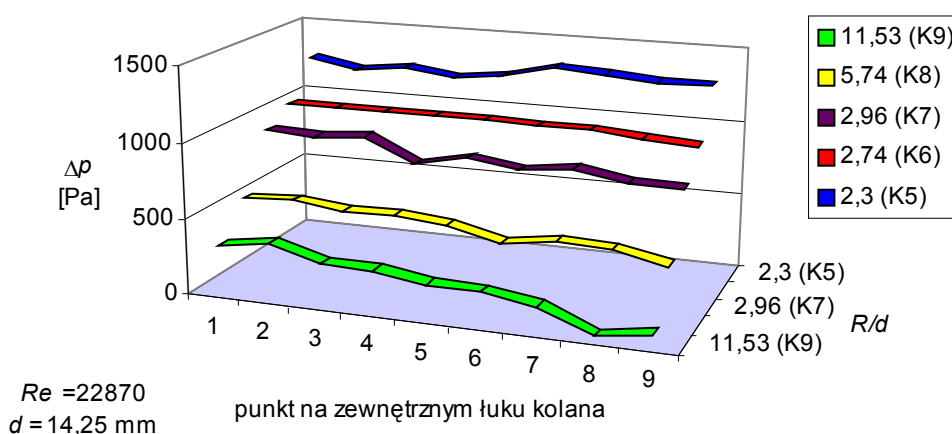
Na rysunkach 4.8 do rysunku 4.10 przedstawiono rozkład ciśnienia statycznego dla przepływomierza kolanowego *K6* w którego kolanie pomiarowym wykonano dwa otwory impulsowe poboru ciśnienia spiętrzenia o średnicy 1,5 mm leżące na dwusiecznej kąta zagięcia łuku kolanowego. Jeden z otworów poboru ciśnienia wykonano na łuku wewnętrznym kolana, a drugi po stronie przeciwnej zagiętego kanału osiowosymetrycznego na łuku zewnętrznym.

Na rysunkach 4.11 do rysunku 4.13 przedstawiono symulacyjny rozkład ciśnienia statycznego w układzie przepływomierza kolanowego przedstawionego na rysunkach 4.8 do rysunku 4.10 (z dwoma otworami poboru ciśnienia) przy zaburzeniu przepływu szczeliną o szerokości 0,5 mm na połączeniu między kolaniem pomiarowym *K6*, a prostoliniowym odcinkiem przewodu osiowosymetrycznego stabilizującego przepływ dopływającej wody.

5. PORÓWNANIE BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH Z SYMULACJAMI NUMERYCZNYMI

Na stanowisku pomiarowym opisanym w rozdziale 3.1 przeprowadzono badania eksperymentalne wykonanych modeli przepływomierzy kolanowych wg rys. 3.3.1 z otworami poboru ciśnienia wykonanymi zgodnie z rys.3.3.3. Otrzymane dane pomiarowe, w sposób pośredni pozwalają wyznaczyć objętościowy strumień natężenia przepływu, jak również rozkłady spiętrzenia ciśnienia między łukami (zewnątrznym i wewnętrznym) badanych kolan. Otrzymane wyniki pomiarów doświadczalnych przedstawiono w formie wykresów na rys. 5.1 do rys. 5.24.

Na rys. 5.1 przedstawiono dla wybranych kolan $K5 \div K9$ rozkład ciśnienia spiętrzenia między punktem C leżącym na wewnętrznym łuku kolana a punktami $1 \div 9$ leżącymi na łuku zewnętrznym, przy turbulentnym przepływie wody dla liczby $Re = 22870$.



Rys. 5.1. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla wybranych kolan $K5 \div K9$ między punktem C na łuku wewnętrznym, a punktami $1 \div 9$ na łuku zewnętrznym przy liczbie $Re=22870$

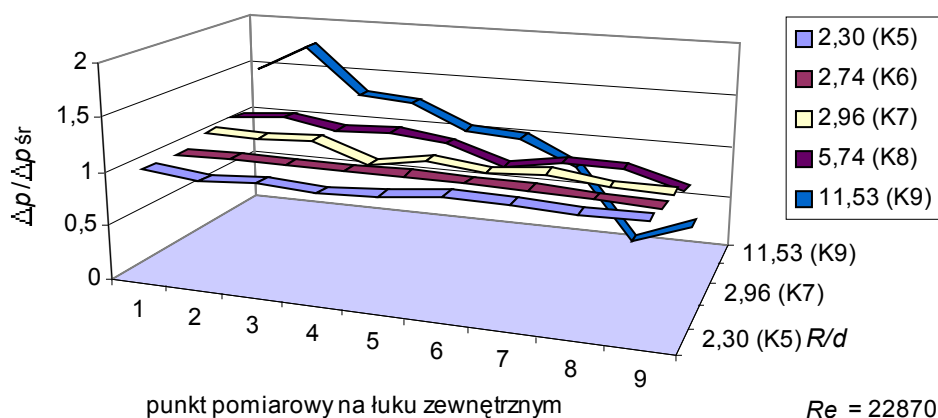
Z wykresów przedstawionych na rys. 5.1 wynika, że dla względnego promienia zagięcia kolana przepływomierza $R/d = 2,7$ ($K6$), rozkład ciśnienia spiętrzenia między punktem C leżącym na wewnętrznym łuku a punktami $1 \div 9$ leżącymi na zewnętrznym łuku kolana jest prawie poziomą linią prostą w przebadanym zakresie (sieczna - kąt $45^\circ \pm 15^\circ$). Natomiast wartości największych wzniesień (Δp_{max}) i największych wgłębień (Δp_{min}) w linii rozkładu ciśnienia spiętrzenia wzdłuż przepływu dla $Re = 22870$ przedstawiono w tabeli 5.1. Ze wzrostem wartości względnego promienia gięcia r/d wzrasta średnia droga przepływu płynu i związana z tym strata ciśnienia (linii ciśnienia spiętrzenia ulega pochyleniu – zmniejszanie wartości spiętrzenia wzdłuż przepływu).

Występujące w rozkładzie ciśnienia spiętrzenia zafalowania wzdłuż linii przepływu między punktem *C*, a punktami pomiarowymi leżącymi na łuku zewnętrznym sugerują, że powstałe w wyniku przepływu zaburzenia tworzą wiry, jest to szczególnie widoczne dla łuku kolanowego *K9*.

Tabela 5.1. Wartości ciśnienia spiętrzenia dla wybranych kolan *K5÷K9* przy przepływie wody ($Re = 22870$)

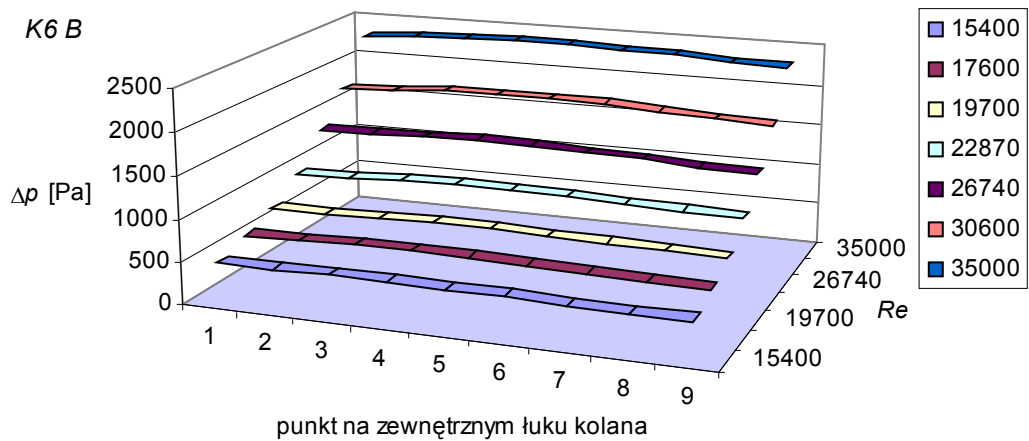
		<i>K5</i>	<i>K6</i>	<i>K7</i>	<i>K8</i>	<i>K9</i>
Δp_{sr}	[Pa]	1262	1004	835	479	206
Δp_{max}	[Pa]	1320	1022	911	552	363
Δp_{min}	[Pa]	1205	958	768	378	14
$\Delta p_{max} - \Delta p_{min}$	[Pa]	115	64	143	174	349

Na wykresie z rys. 5.2 przedstawiono przykładowe rozkłady względnego ciśnienia spiętrzenia $\Delta p / \Delta p_{sr}$ między punktem pomiarowym *C* na łuku wewnętrznym a pozostałymi punktami pomiarowymi *1÷9* znajdującymi się na łuku zewnętrznym dla wybranych przepływomierzy kolanowych, które charakteryzują się względnym promieniem gięcia R/d od 2,30 do 11,53.

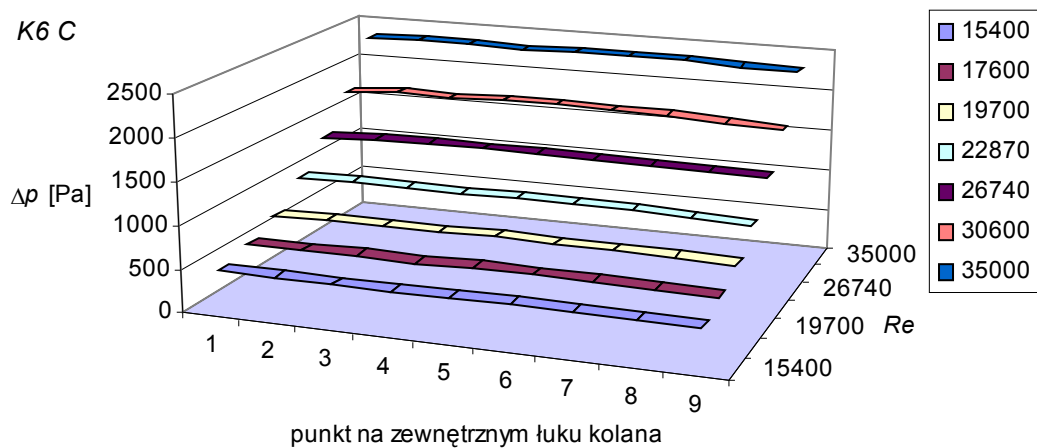


Rys. 5.2. Rozkład względnego ciśnienia spiętrzenia $\Delta p / \Delta p_{sr}$ dla kolana *K5÷K9* między punktem *C* na łuku wewnętrznym, a punktami *1÷9* na łuku zewnętrznym przy liczbie $Re=22870$

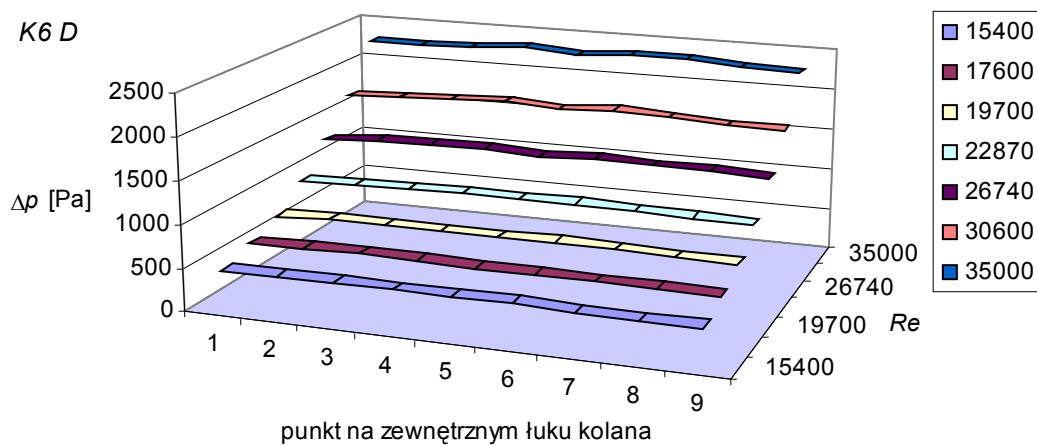
Gdzie Δp_{sr} jest średnią wartością z dziewięciu pomiarów spiętrzenia, którą wyznaczono indywidualnie dla każdego rozpatrywanego względnego promienia gięcia R/d między punktem pomiarowym *C* leżącym na łuku wewnętrznym, a punktami pomiarowymi na łuku zewnętrznym przy stałej liczbie Reynoldsa $Re = 22870$.



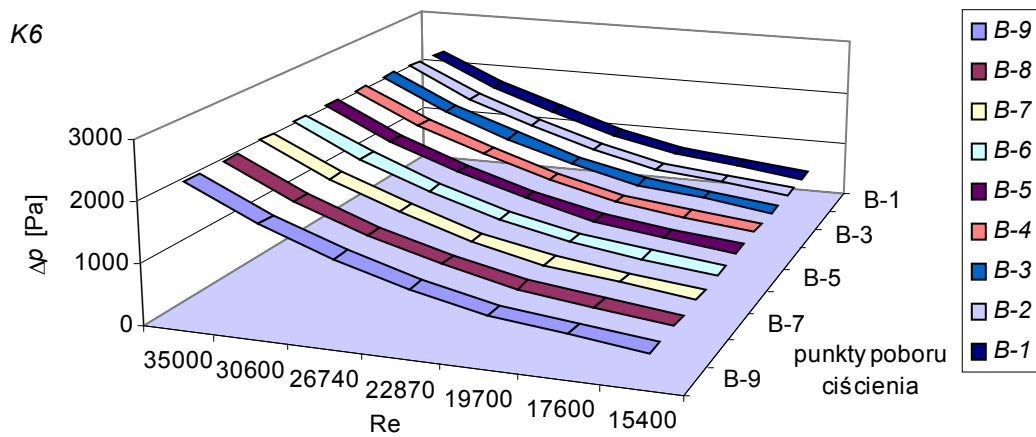
Rys. 5.3. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana *K6* między punktem *B* na łuku wewnętrznym a punktami 1÷9 na łuku zewnętrznym przy różnych liczbach *Re*



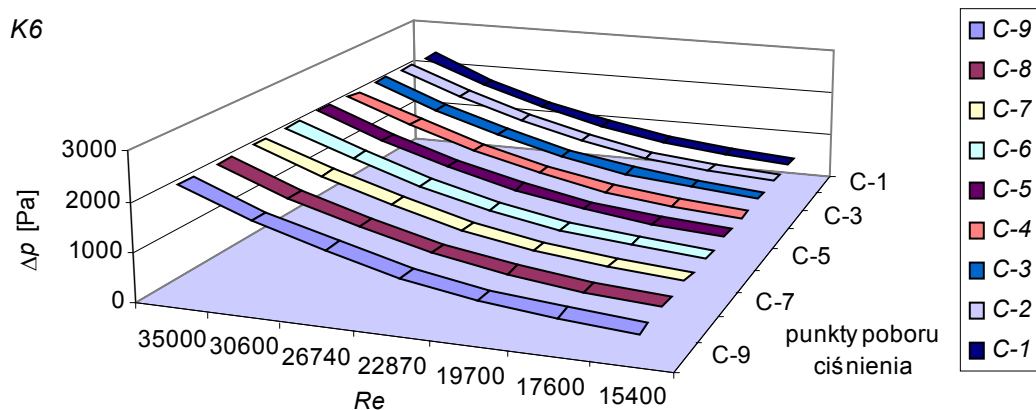
Rys. 5.4. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana *K6* między punktem *C* na łuku wewnętrznym a punktami 1÷9 na łuku zewnętrznym przy różnych liczbach *Re*



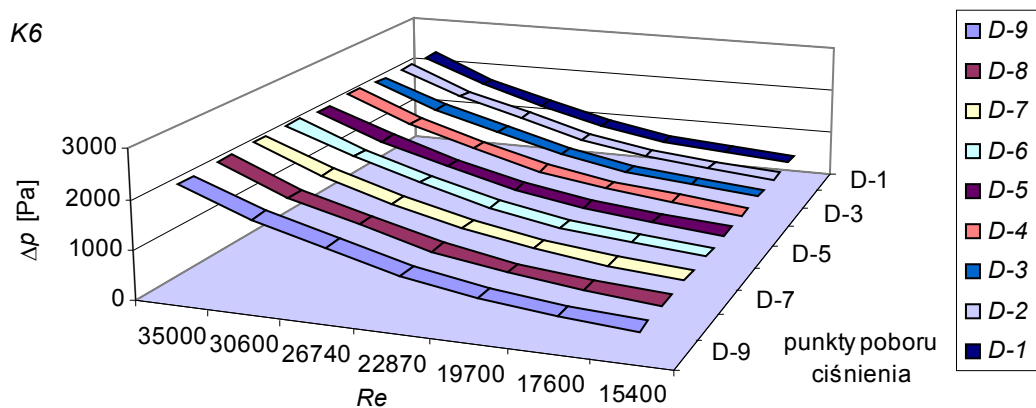
Rys. 5.5. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana *K6* między punktem *D* na łuku wewnętrznym a punktami 1÷9 na łuku zewnętrznym przy różnych liczbach *Re*



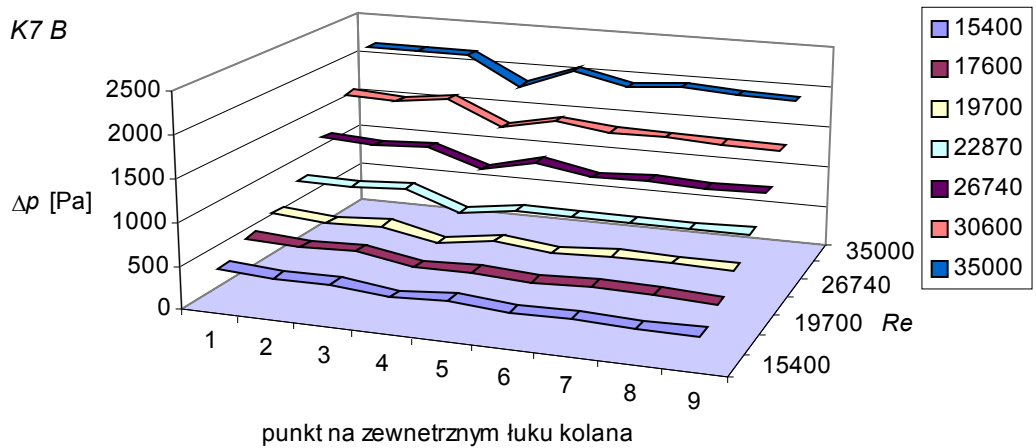
Rys. 5.6. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana K6 przy różnych liczbach Re między parami punktów poboru ciśnienia B-1÷B-9



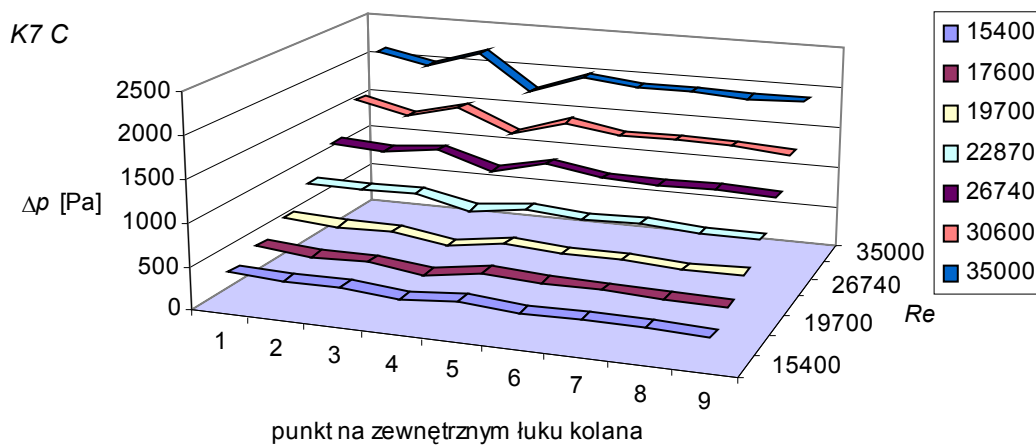
Rys. 5.7. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana K6 przy różnych liczbach Re między parami punktów poboru ciśnienia C-1÷C-9



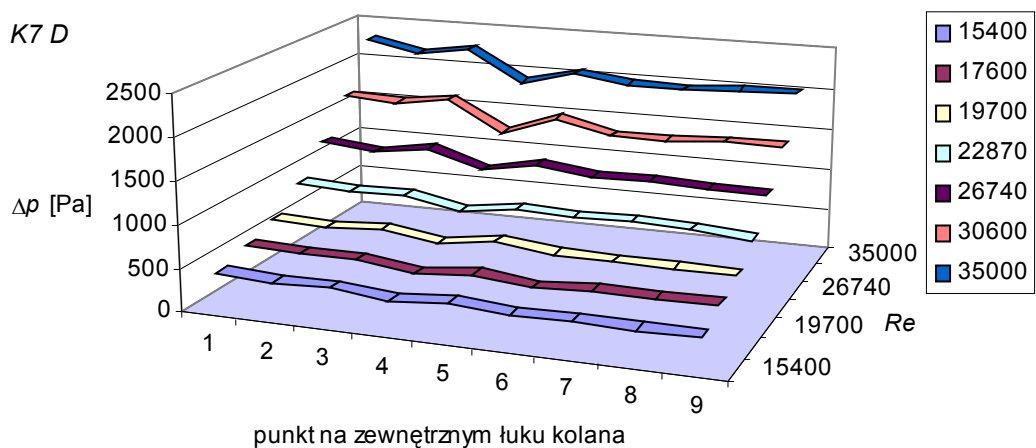
Rys. 5.8. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana K6 przy różnych liczbach Re między parami punktów poboru ciśnienia D-1÷D-9



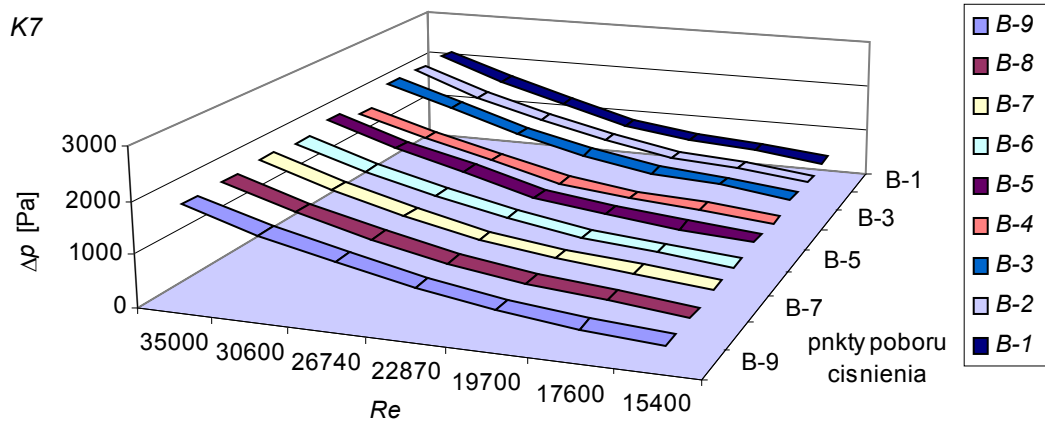
Rys. 5.9. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana K7 między punktem B na łuku wewnętrznym a punktami 1÷9 na łuku zewnętrznym przy różnych liczbach Re



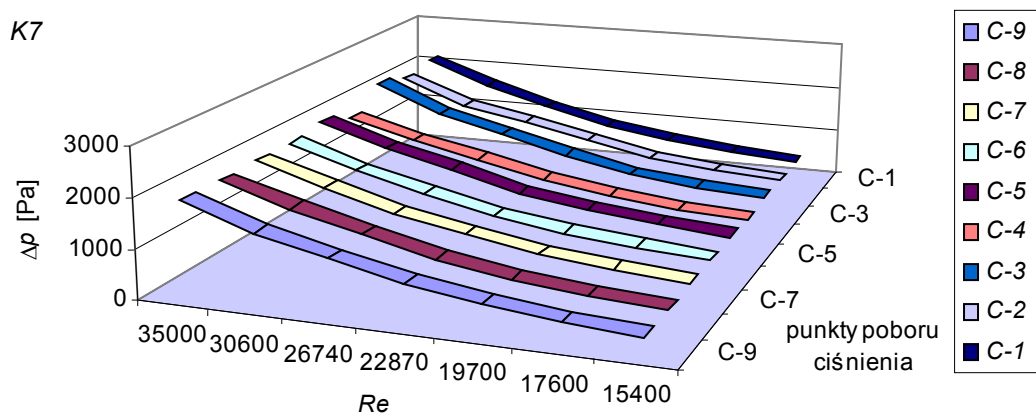
Rys. 5.10. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana K7 między punktem C na łuku wewnętrznym a punktami 1÷9 na łuku zewnętrznym przy różnych liczbach Re



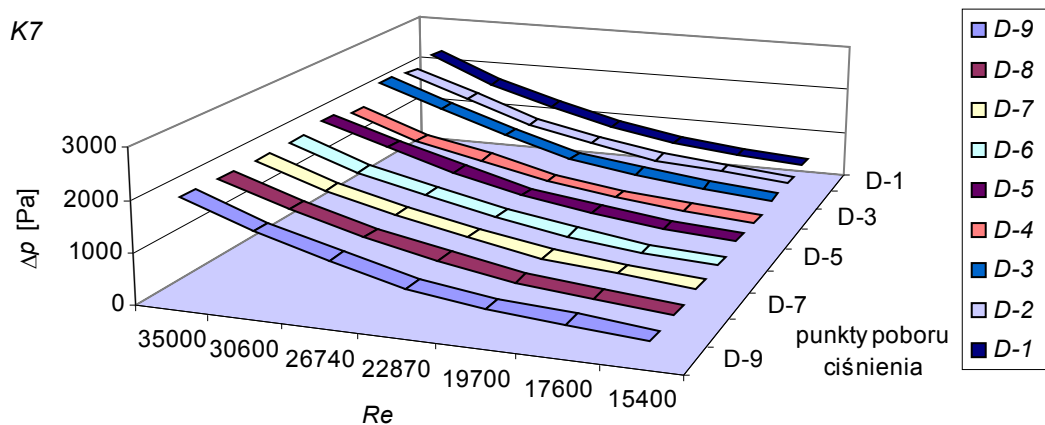
Rys. 5.11. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana K7 między punktem D na łuku wewnętrznym a punktami 1÷9 na łuku zewnętrznym przy różnych liczbach Re



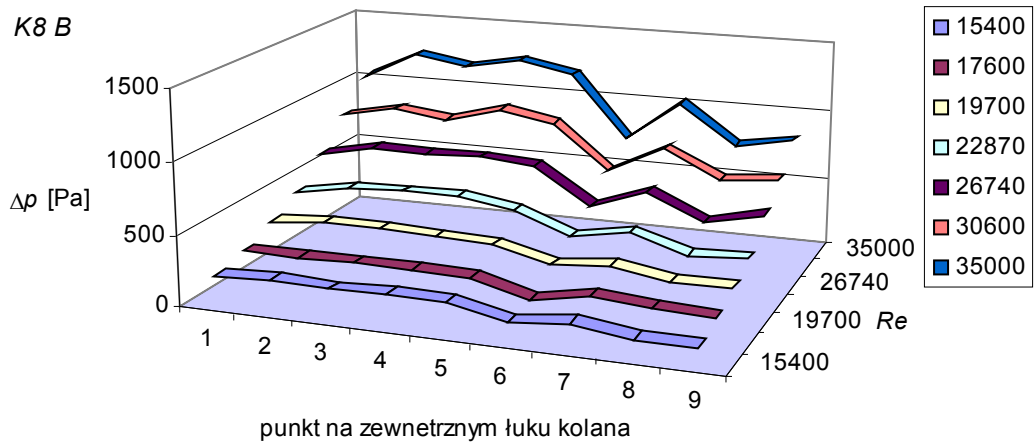
Rys. 5.12. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana $K7$ przy różnych liczbach Re między parami punktów poboru ciśnienia $B-1 \div B-9$



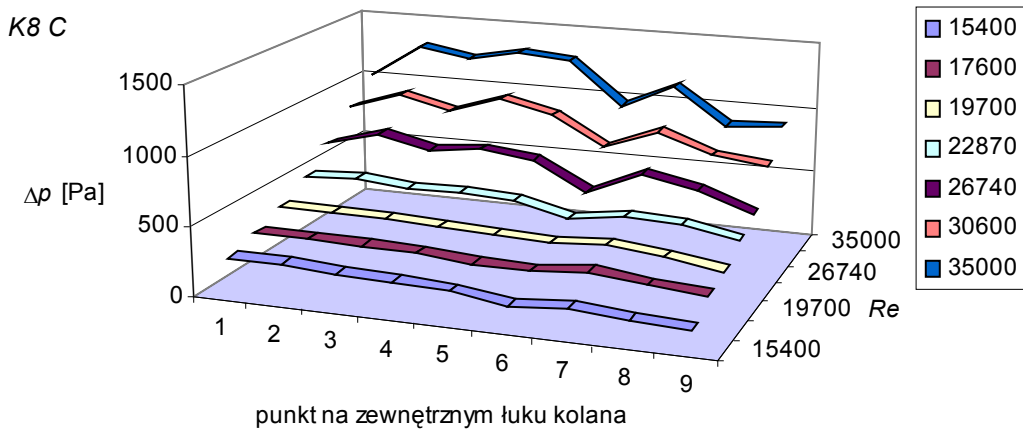
Rys. 5.13. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana $K7$ przy różnych liczbach Re między parami punktów poboru ciśnienia $C-1 \div C-9$



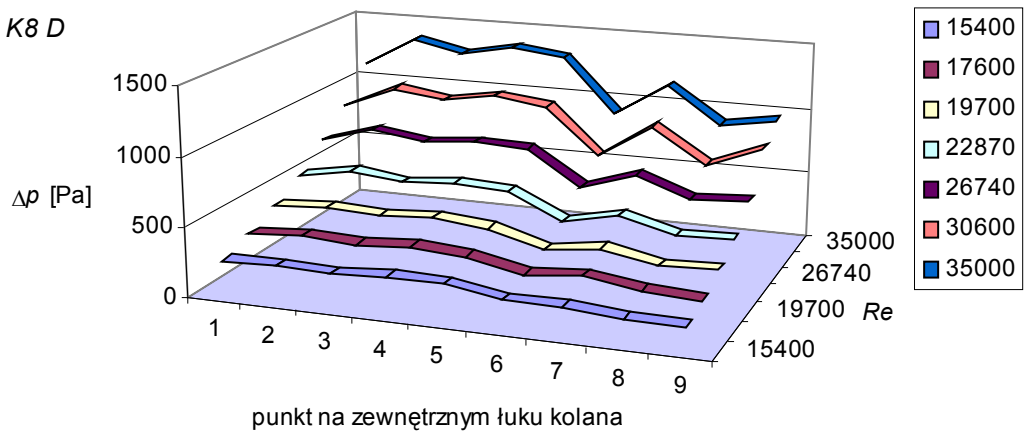
Rys. 5.14. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana $K7$ przy różnych liczbach Re między parami punktów poboru ciśnienia $D-1 \div D-9$



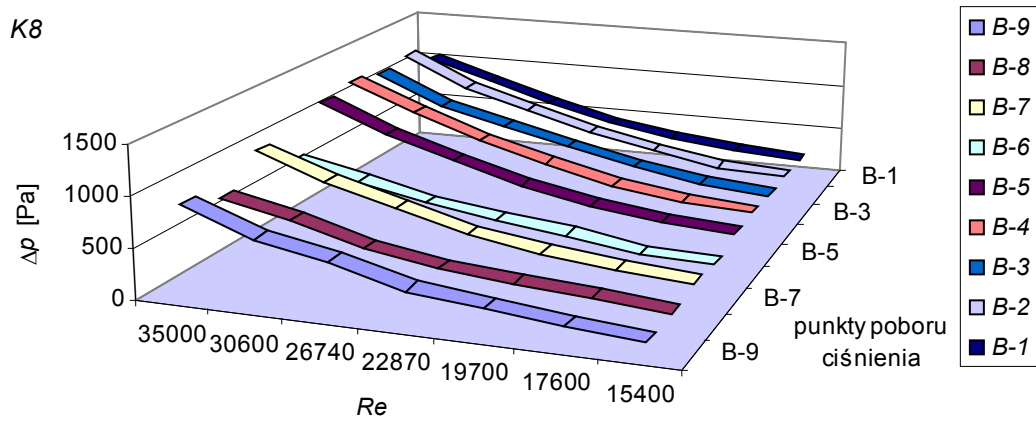
Rys. 5.15. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana K8 między punktem B na łuku wewnętrznym a punktami 1÷9 na łuku zewnętrznym przy różnych liczbach Re



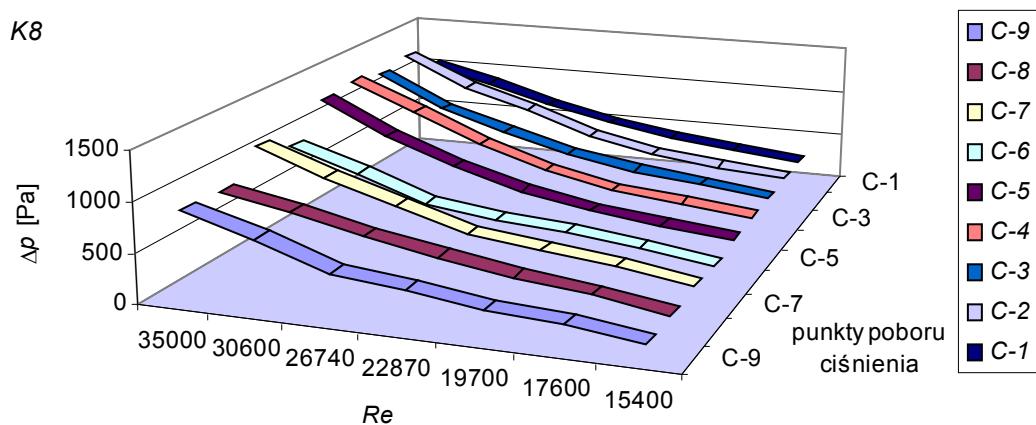
Rys. 5.16. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana K8 między punktem C na łuku wewnętrznym a punktami 1÷9 na łuku zewnętrznym przy różnych liczbach Re



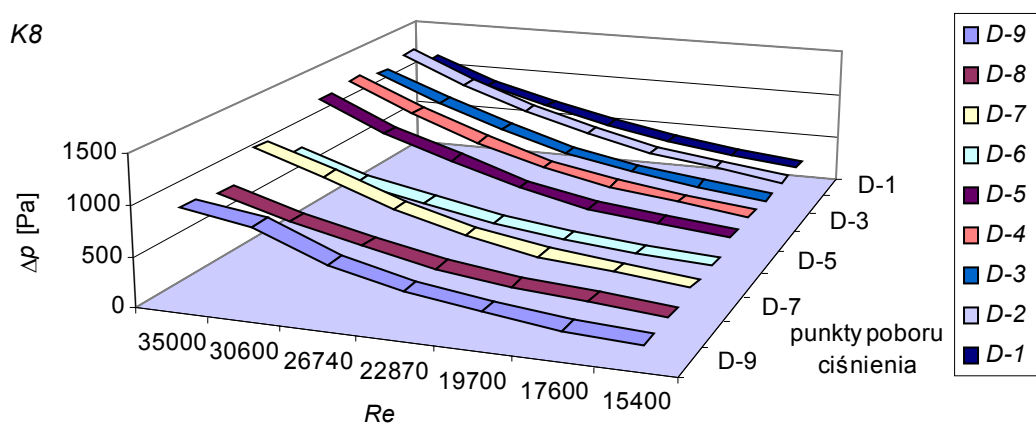
Rys. 5.17. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana K8 między punktem D na łuku wewnętrznym a punktami 1÷9 na łuku zewnętrznym przy różnych liczbach Re



Rys. 5.18. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana $K8$ przy różnych liczbach Re między parami punktów poboru ciśnienia $B-1 \div B-9$



Rys. 5.19. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana $K8$ przy różnych liczbach Re między parami punktów poboru ciśnienia $C-1 \div C-9$



Rys. 5.20. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana $K8$ przy różnych liczbach Re między parami punktów poboru ciśnienia $D-1 \div D-9$

Na rysunkach 5.3 do 5.20 przedstawiono dla wybranych przepływomierzy kolanowych (*K6*, *K7*, *K8*), wyniki uzyskanych doświadczalnie rozkładów ciśnienia spiętrzenia w zależności od dobranych par punktów poboru ciśnienia przy rozwiniętym przepływie turbulentnym w zakresie liczby Reynoldsa $Re = 15400 \div 35000$.

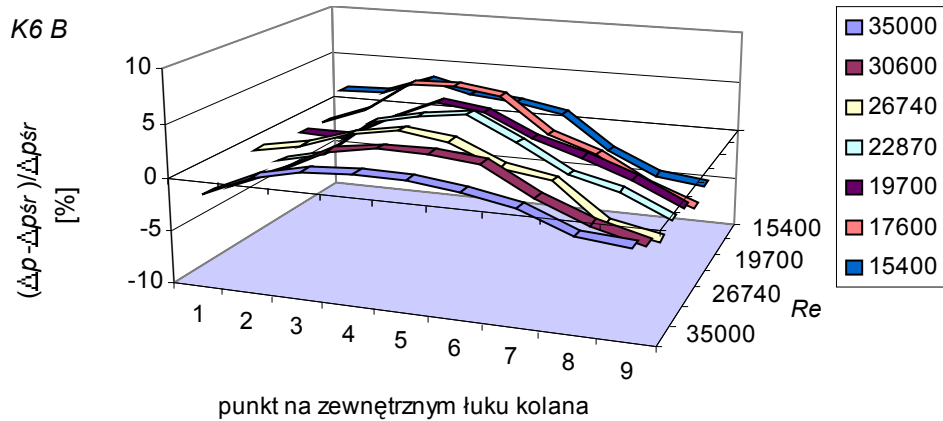
Z przeprowadzonych badań doświadczalnych wynika, że najkorzystniejszym względny promień gięcia jest promień o wartości $R/d \sim 2,74$. Ta wartość odpowiada względnemu promieniowi gięcia przepływomierza *K6* (rys. 5.3 do rys. 5.8), dla którego pomiar rozkładu ciśnienia spiętrzenia jest praktycznie niezależny od punktów poboru ciśnienia, jeżeli usytuowano je w pobliżu dwusiecznej kąta zagięcia kolana 90° . I tak na łuku wewnętrznym zagięcia kolana, punkt poboru ciśnienia może być usytuowany w granicach do $\pm 10^\circ$, a na łuku zewnętrznym do $\pm 15^\circ$ od dwusiecznej kąta gięcia kolana bez pogorszenia uzyskanych wyników spiętrzeń w przypadku przepływu turbulentnego dla różnych liczb Reynoldsa Re z przebadanego zakresu pomiarowego. Ze wzrostem wielkości względnego promienia gięcia kolana R/d przepływomierza kolanowego oraz liczby Reynoldsa Re wzrasta nierównomierność rozkładu spiętrzenia ciśnienia wzdłuż linii przepływu płynu (wody) w temperaturze otoczenia $21^\circ\text{C} \pm 1^\circ$ (rys. 5.9 do rys. 5.20). Uwidacznia się to między innymi dla kolana *K7* i *K8* w obrębie dwusiecznej kąta zagięcia, gdzie wystarczy niewielkie przesunięcie np. o 5° kątowych punktu poboru ciśnienia na łuku zewnętrznym.

Na rys. 5.21 do rys. 5.23 przedstawiono w postaci wykresów, przykładowe rozkłady względnego przyrostu ciśnienia spiętrzenia określone zależnością:

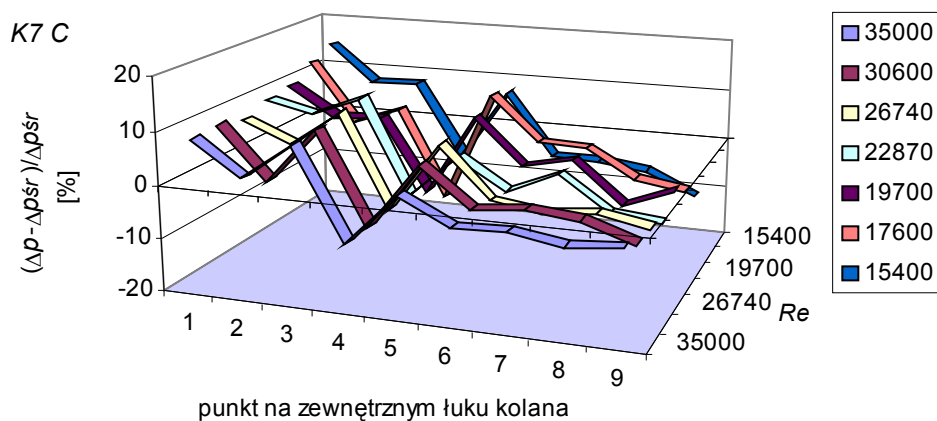
$$\delta_{\Delta p} = (\Delta p - \Delta p_{sr}) / \Delta p_{sr} \quad (5.1)$$

dla przebadanych kolan *K6*, *K7* i *K8*, w funkcji liczby Reynoldsa Re między wybranymi punktami poboru ciśnienia spiętrzenia przy przepływie wody. Z przedstawionych wykresów wynika, że ze wzrostem względnego promienia gięcia kolana wzrasta procentowy względny przyrost ciśnienia spiętrzenia $\delta_{\Delta p}$.

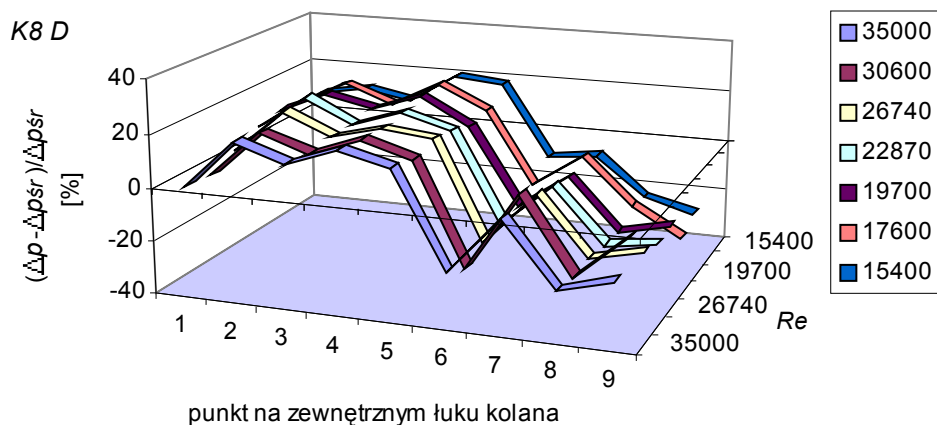
Wzrasta również nierównomierność rozkładu względnego przyrostu ciśnienia spiętrzenia $\delta_{\Delta p}$ wzdłuż zewnętrznego łuku pomiarowego, który jest zależny od badanego kolana. W funkcji liczby Re (Re z zakresu $15400 \div 35000$) najmniejszą nierównomierność rozkładu dla względnego przyrostu ciśnienia spiętrzenia $\delta_{\Delta p} < |6,1\%|$ wyznaczono dla kolana *K6*, a największą o wartości $\delta_{\Delta p} < |39,1\%|$ dla kolana *K8*.



Rys. 5.21. Rozkład względnego przyrostu ciśnienia spiętrzenia $(\Delta p - \Delta p_{sr}) / \Delta p_{sr}$ dla kolana *K6* między punktem *B*, a punktami $1 \div 9$ w funkcji liczby *Re*



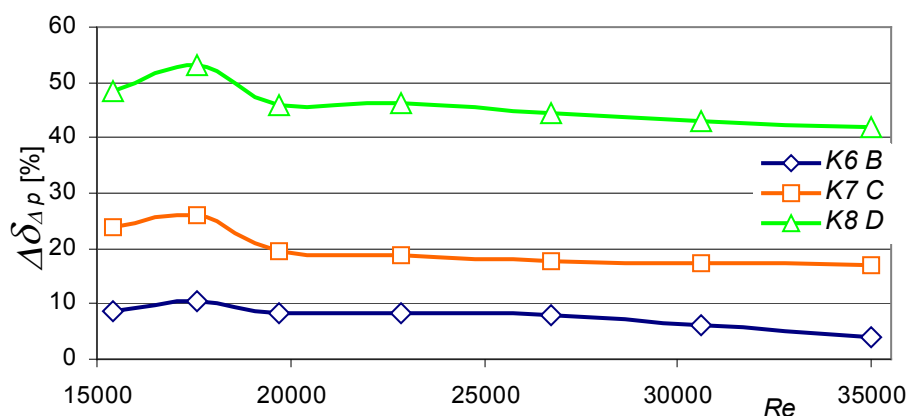
Rys. 5.22. Rozkład względnego przyrostu ciśnienia spiętrzenia $(\Delta p - \Delta p_{sr}) / \Delta p_{sr}$ dla kolana *K7* między punktem *C*, a punktami $1 \div 9$ w funkcji liczby *Re*



Rys. 5.23. Rozkład względnego przyrostu ciśnienia spiętrzenia $(\Delta p - \Delta p_{sr}) / \Delta p_{sr}$ dla kolana *K8* między punktem *D*, a punktami $1 \div 9$ w funkcji liczby *Re*

Z wykresów przedstawionych na rys. 5.21 do rys. 5.23 wynika, że wyznaczone w badaniach doświadczalnych kształty rozkładu względnego przyrostu ciśnienia spiętrzenia $\delta_{\Delta p}$ nie zależą od liczby Re lecz od względnego promienia gięcia kolana R/d .

Na rys. 5.24 przedstawiono, dla wybranych przepływomierzy kolanowych $K6$, $K7$, $K8$, rozkłady odchyłek względnego przyrostu ciśnienia spiętrzenia $\Delta\delta_{\Delta p} = f(Re)$. Odchyłkę tą określamy jako sumę największego dodatniego wzniesienia $\delta_{\Delta p \max}$ i bezwzględnej wartości największego wgłębienia $\delta_{\Delta p \min}$, wzdłuż punktów pomiarowych ciśnienia spiętrzenia leżących na łuku zewnętrznego zagięcia kolana od linii zerowej względnego przyrostu ciśnienia spiętrzenia (rys. 5.21 do rys. 5.23). Przedstawione rozkłady przyrostu odchyłki $\Delta\delta_{\Delta p} = f(Re)$ wybranych przepływomierzy mają bardzo podobne kształty, różnią się tylko co do wartości.

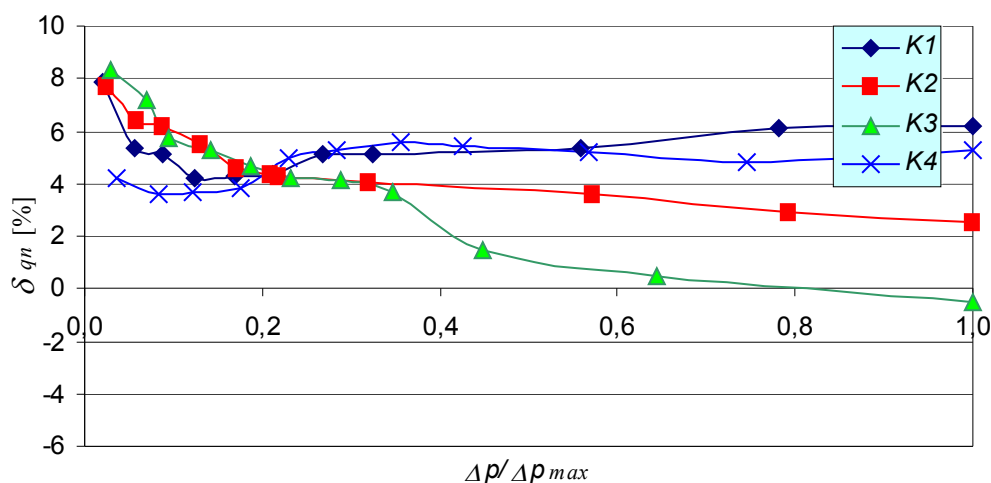


Rys. 5.24. Zależność przyrostu odchyłki $\Delta\delta_{\Delta p}$ w funkcji liczby Re

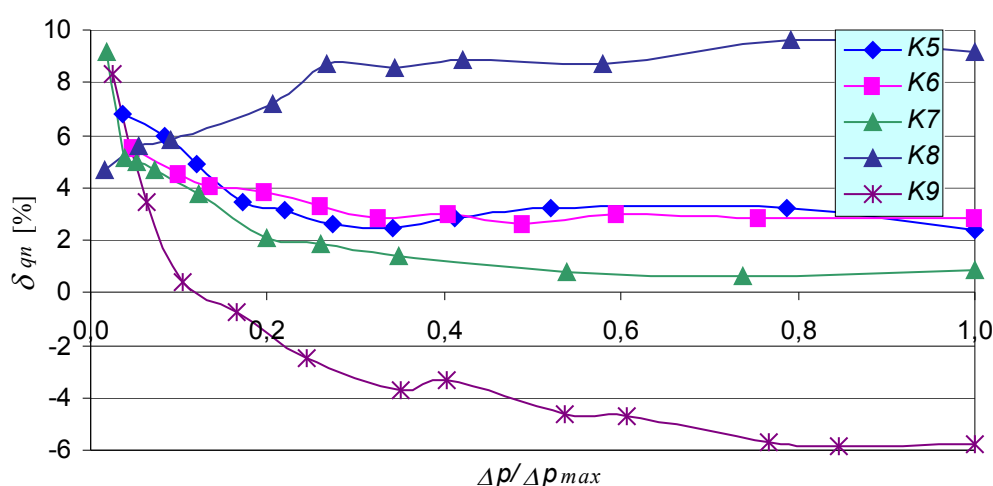
Z przedstawionych na rys. 5.24 wykresów wynika, że dla przebadanych przepływomierzy kolanowych w zakresie liczby Reynoldsa $Re = 15400$ do $Re = 35000$, najmniejsza wartość odchyłki względnego przyrostu ciśnienia spiętrzenia $\Delta\delta_{\Delta p}$ występuje dla kolana $K6$, dla którego nie przekracza 10,4% przy liczbie $Re = 17600$. Przy wzroście liczby Reynoldsa do $Re = 35000$ wartość odchyłki względnego przyrostu ciśnienia spiętrzenia $\Delta\delta_{\Delta p}$ spada do 3,9% tj. o 6,5% przy zmianie liczby Reynoldsa od 17600 do 35000. Największą wartość odchyłki względnego przyrostu ciśnienia spiętrzenia $\Delta\delta_{\Delta p}$ osiąga dla kolana $K8$ przy liczbie $Re = 17600$, nie przekracza wartości 53,3% i podobnie jak dla kolana $K6$ wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa nieznacznie spada o 11,3% do wartość ok. 42% przy liczbie $Re = 35000$.

Na rys. 5.25 i rys. 5.26 dla przepływomierzy kolanowych $K1 \div K9$ przedstawiono przy wybranych bezwymiarowych wartościach ciśnienia spiętrzenia, procentowy rozkład względnego błędu obliczenia strumienia objętości δ_{qn} (wyznaczony indywidualnie dla każdego punktu „ n ” określonego wartością ciśnienia spiętrzenia, między strumieniem objętości obliczonym wg zależności inżynierskiej $q_{vin} = q_v$ (1.18) przy przyjętym współczynniku przepływu przepływomierza kolanowego $C = 1$, a strumieniem objętości wyznaczonym doświadczalnie q_{vn}) który określono zależnością:

$$\delta_{qn} = \frac{q_{vin} - q_{vn}}{q_{vin}} \cdot 100\% \quad (5.2)$$



Rys. 5.25. Procentowy rozkład względnego błędu obliczenia strumienia objętości δ_{qn} dla kolan: $K1 \div K4$



Rys. 5.26. Procentowy rozkład względnego błędu obliczenia strumienia objętości δ_{qn} dla kolan: $K5 \div K9$

Dla przepływomierzy kolanowych na rys. 5. 25 i rys 5. 26 przedstawiono w postaci wykresów względny błąd procentowy obliczeń strumienia objętości między obliczeniami inżynierskimi, a wynikami otrzymanymi doświadczalnie. Powstający w tym przypadku błąd między obliczeniami inżynierskimi strumienia objętości, a wynikami uzyskanymi doświadczalnie nie przekraczają 4,2% dla kolan $K2, K3, K5, K6, K7$ (charakteryzujących się względnym promieniem gięcia $2,3 \leq R/d \leq 3,53$) w zakresie zmian bezwymiarowego przyrostu ciśnienia spiętrzenia $\Delta p/\Delta p_{\max}$ od 20% do 100%.

Dla wybranych przestrzennych modeli symulacji ($3D k-\omega$, $3D k-\varepsilon$, $3D LES$) na rys. 5.27 do rys. 5.35 przedstawiono wyznaczone w obliczeniach numerycznych wyniki rozkładu ciśnienia spiętrzenia (Δp) i rozkładu względnego błędu symulacji (δ_{sym}). Wyznaczono numerycznie wartości ciśnienia spiętrzenia w kolanie przepływomierza $K6$ między punktem C leżącym na łuku wewnętrznym, a punktami $1...9$ leżącymi na łuku zewnętrznym zagięcia kanału osiowosymetrycznego (wg rys. 3.3.3) przy strumieniu przepływającej wody, określonym liczbą Reynoldsa $Re = 30600$. Celem porównania wyników rozkładu spiętrzenia otrzymanych w trakcie symulacji numerycznych z badaniami doświadczalnymi na przedstawione wykresy naniesiono wyniki uzyskane w trakcie pomiarów (linia oznaczona jako „pom.”) przepływu wody przez kolano przepływomierza z kompletem otworów impulsowych (wg rys. 3.3.3) poboru ciśnienia (pięć otworów poboru ciśnienia na łuku wewnętrznym i dziewięć otworów na łuku zewnętrznym).

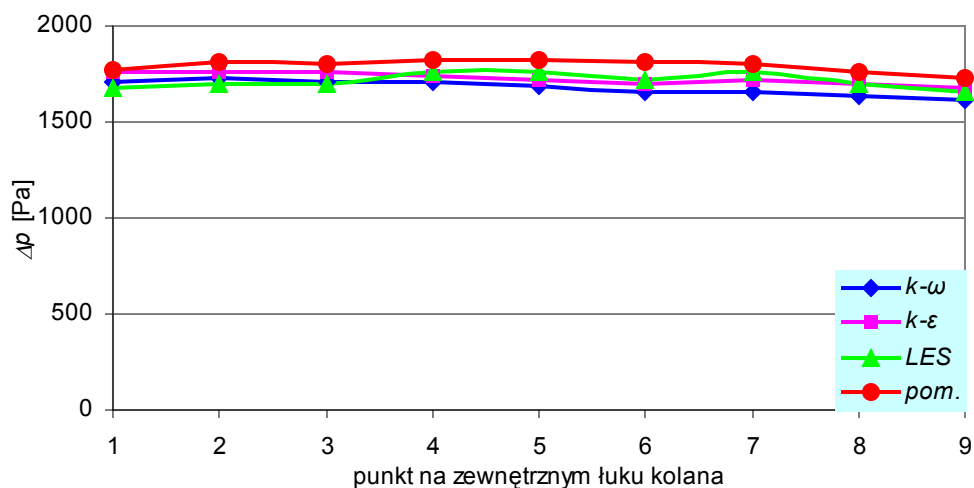
Dla wybranych modeli symulacji przedstawiono również w postaci wykresów obliczone wartości rozkładów względnego błędu symulacji ciśnienia spiętrzenia dla każdej pary punktów poboru ciśnienia (między punktem C , a kolejnymi punktami $1...9$) korzystając z zależności:

$$\delta_{sym} = (\Delta p - \Delta p_{sym}) / \Delta p \quad (5.3)$$

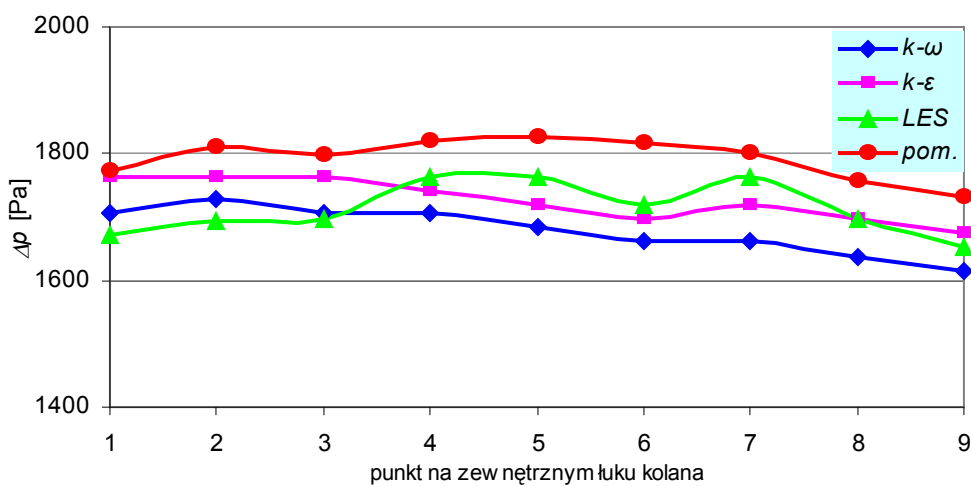
gdzie przez:

- Δp oznaczono spiętrzenie uzyskane z pomiarów doświadczalnych,
- Δp_{sym} oznaczono spiętrzenie uzyskane z symulacji numerycznej.

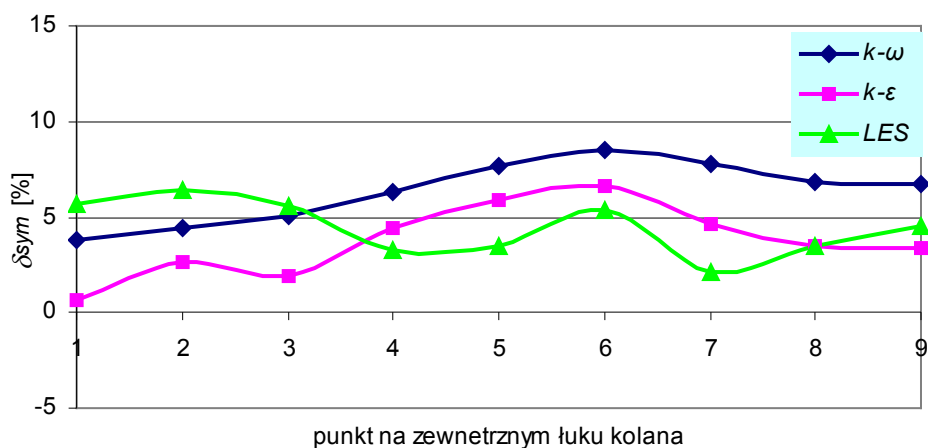
Przy przepływie wody dla liczby $Re = 30600$ na rys. 5.27 i rys. 5.28 przedstawiono symulacyjne rozkłady ciśnienia spiętrzenia występujące w kolanie przepływomierza krzywakowego $K6$ bez wykonanych otworów poboru ciśnienia (nie występują dodatkowe zaburzenia przepływu wody spowodowanego otworami impulsowymi).



Rys. 5.27. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana $K6$ między punktem C, a punktami 1÷9 (kolano bez otworów poboru ciśnienia)



Rys. 5.28. Rozkład ciśnienia spiętrzenia (rozszerzona skala spiętrzenia) dla kolana $K6$ między punktem C, a punktami 1÷9 (kolano bez otworów poboru ciśnienia)

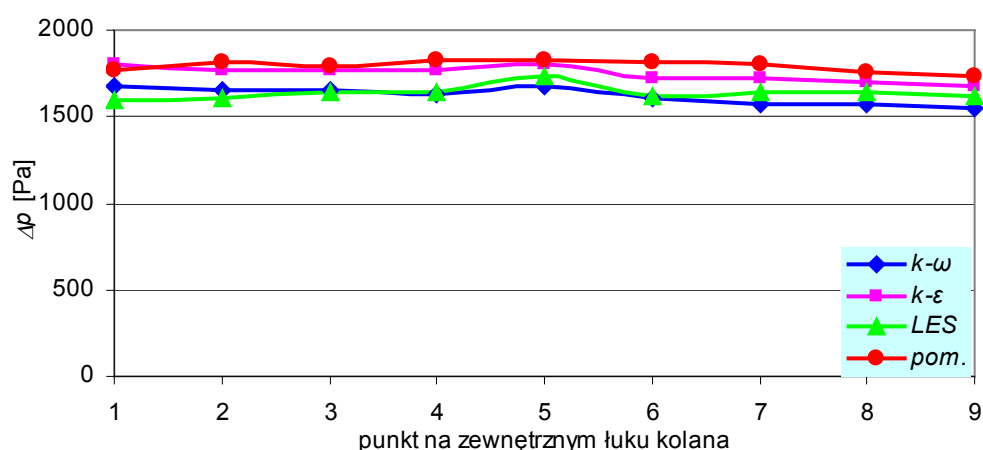


Rys. 5.29. Rozkład względnego błędu symulacji spiętrzenia ciśnienia dla kolana $K6$ między punktem C, a punktami 1÷9 (kolano bez otworów poboru ciśnienia)

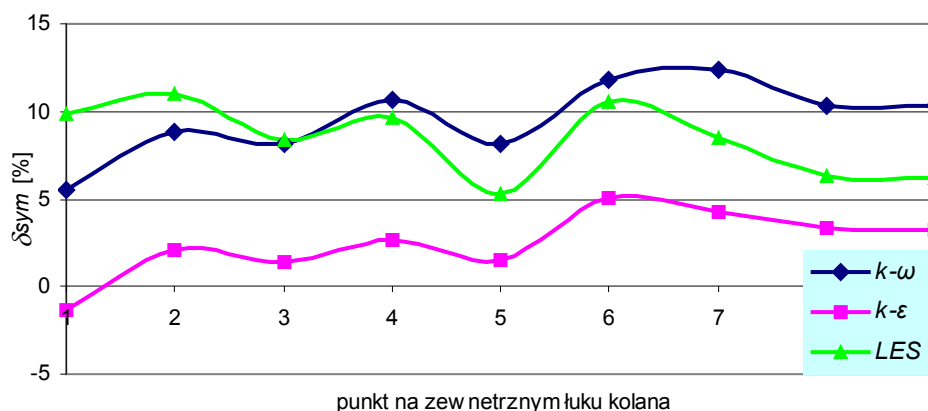
Z przeprowadzonych symulacji wynika że dla wszystkich modeli rozkłady ciśnienia mają wartości zaniżone w stosunku do otrzymanych wyników doświadczalnych.

Rozkład ciśnienia spiętrzenia uzyskany dla modelu przestrzennego 3D LES charakteryzuje się podobnym kształtem do rozkładu uzyskanego doświadczalnie, który dla typowego miejsca poboru ciśnienia, czyli na dwusiecznej kąta zagięcia kolana, najlepiej odzwierciedla wartości ciśnienia spiętrzenia. Występujący wówczas dla punktów impulsowych C-5 względny błąd symulacji ciśnienia spiętrzenia nie przekracza 3,4% (rys. 5.29).

Dla kolana przepływomierza krzywakowego K6 z dwoma otworami poboru ciśnienia usytuowanymi na dwusiecznej kąta zagięcia (rys. 5.30) przedstawiono w postaci wykresów wyniki rozkładów ciśnienia spiętrzenia uzyskane w trakcie symulacji numerycznej wybranych modeli przestrzennych ($k-\omega$, $k-\epsilon$, LES) przy przepływie wody dla liczby $Re = 30600$.



Rys. 5.30. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana K6 między punktem C, a punktami 1÷9 (kolano z dwoma otworami na dwusiecznej kąta gięcia)

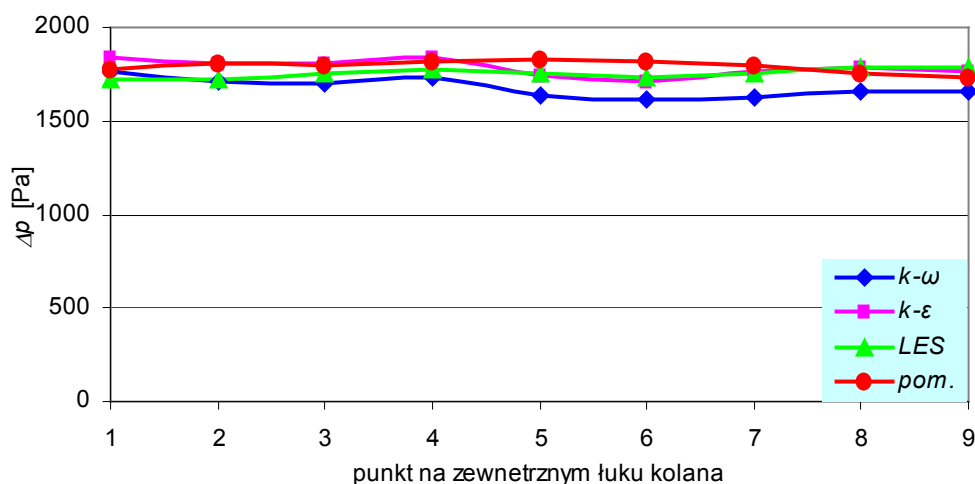


Rys. 5.31. Rozkład względnego błęd symulacji spiętrzenia ciśnienia dla kolana K6 między punktem C, a punktami 1÷9 (kolano z dwoma otworami na dwusiecznej kąta gięcia)

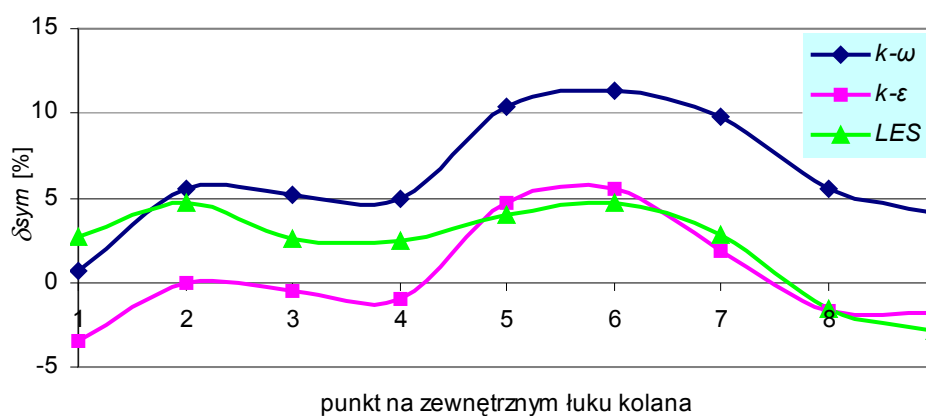
W tym przypadku kształt jak i wartości rozkładu ciśnienia wzdłuż punktów poboru ciśnienia na łuku zewnętrznym najlepiej odzwierciedla model $3D$ $k-\varepsilon$.

Dla tego modelu występuje najmniejsza rozbieżność między porównywanymi wynikami uzyskanymi w badaniach doświadczalnych i w symulacji numerycznej. Występujący wówczas względny błąd symulacji ciśnienia spiętrzenia nie przekracza 1,5% dla punktów impulsowych poboru ciśnienia $C-5$ (rys.5. 31).

Dla kolana przepływomierza krzywakowego $K6$, w którym zgodnie z rys. 3.3.3 wykonano czternaście otworów poboru ciśnienia, przedstawiono w postaci wykresów na rys. 5. 32 wyniki rozkładów ciśnienia spiętrzenia Δp uzyskane w trakcie symulacji numerycznej wybranych modeli przestrzennych ($k-\omega$, $k-\varepsilon$, LES) przy przepływie wody dla liczby $Re = 30600$.



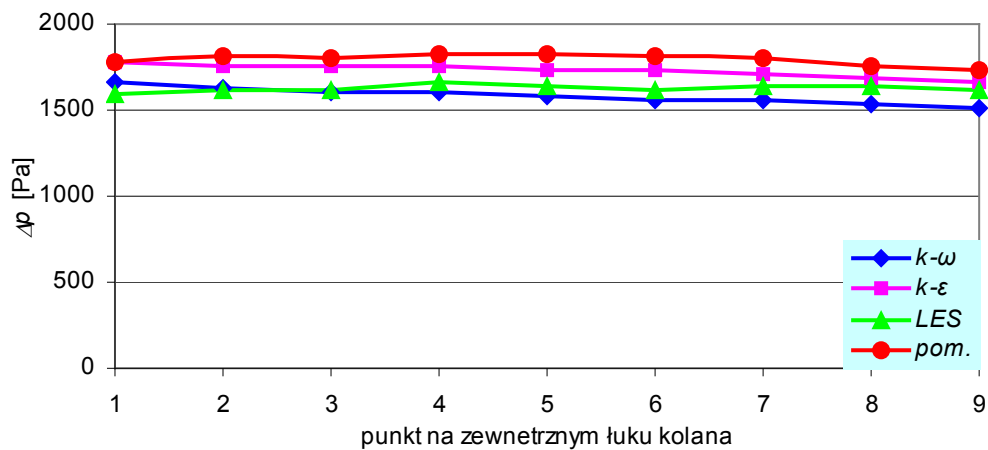
Rys. 5.32. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana $K6$ między punktem C, a punktami $1-9$ (kolano z 14 otworami na dwusiecznej kąta gięcia)



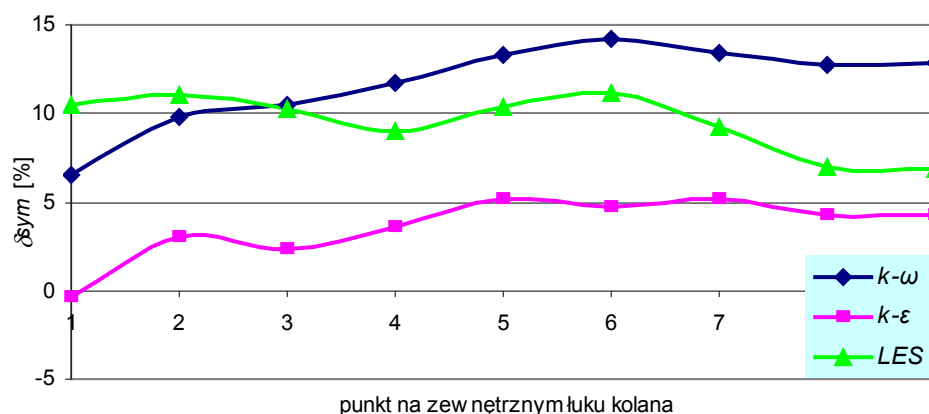
Rys. 5.33. Rozkład względnego błęd symulacji spiętrzenia ciśnienia dla kolana $K6$ między punktem C, a punktami $1-9$ (kolano z 14 otworami na dwusiecznej kąta gięcia)

Analiza prowadzi do spostrzeżeń, że w tym przypadku kształt jak i wartości rozkładu ciśnienia wzdłuż punktów poboru ciśnienia na łuku zewnętrznym najlepiej odzwierciedla model 3D LES. Dla tego modelu występuje najmniejsza rozbieżność między porównywanymi wynikami uzyskanymi w badaniach doświadczalnych i w symulacji numerycznej. Występujący wówczas względny błąd symulacji ciśnienia spiętrzenia nie przekracza 4,1% (dla modelu 3D $k-\varepsilon$ wynosi 4,7%) dla punktów impulsowych poboru ciśnienia C-5 (rys.5. 33).

Dla kolana przepływomierza krzywakowego K6 z dwoma otworami poboru ciśnienia usytuowanymi na dwusiecznej kąta zagięcia i szczeliną połączeniową (rys. 5.34) przedstawiono w postaci wykresów wyniki rozkładów ciśnienia spiętrzenia uzyskane w trakcie symulacji numerycznej dla wybranych modeli przestrzennych ($k-\omega$, $k-\varepsilon$, LES) przy przepływie wody przy liczbie $Re = 30600$.



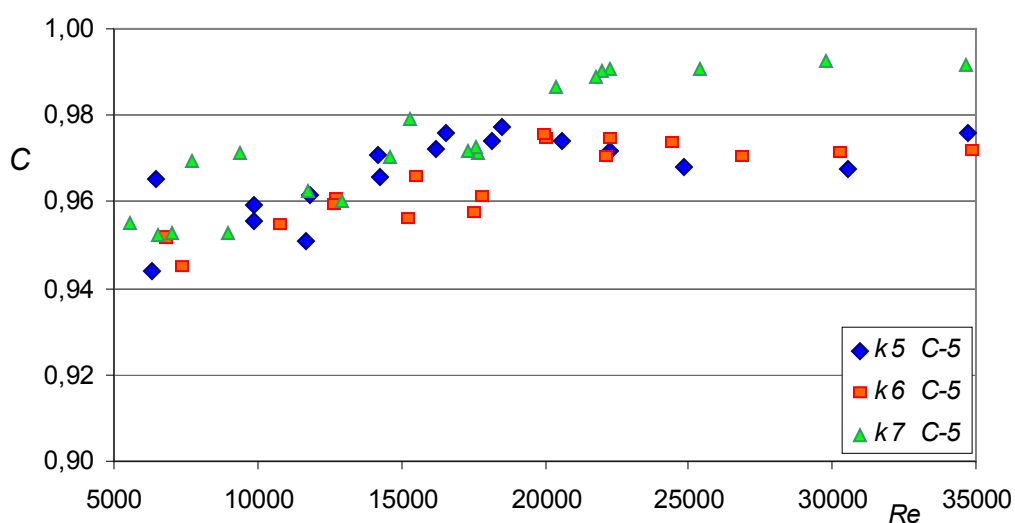
Rys. 5.34. Rozkład ciśnienia spiętrzenia dla kolana K6 między punktem C, a punktami 1÷9 (kolano z dwoma otworami na dwusiecznej kąta gięcia i szczeliną połączeniową)



Rys. 5.35. Rozkład względnego błęd symulacji ciśnienia spiętrzenia dla kolana K6 między punktem C, a punktami 1÷9 (kolano z dwoma otworami na dwusiecznej kąta gięcia i szczeliną połączeniową)

W tym przypadku kształt jak i wartości rozkładu ciśnienia wzdłuż punktów poboru ciśnienia na łuku zewnętrznym najlepiej odzwierciedla model $3D k-\varepsilon$. Dla tego modelu występuje najmniejsza rozbieżność między porównywanymi wynikami uzyskanymi w badaniach doświadczalnych i w symulacji numerycznej. Występujący wówczas względny błąd symulacji ciśnienia spiętrzenia nie przekracza 5,1% dla punktów impulsowych poboru ciśnienia C-5 (rys.5.35).

Na rys. 5.36 przedstawiono wyniki doświadczalnego wyznaczenia współczynnika przepływu (obliczonego z równania (3.15) dla wymuszenia pompą) przepływomierza kolanowego $C=f(Re)$ dla wybranych kolan K5÷K7 przy przepływającym strumieniu cieczy określonym liczbą Reynoldsa $Re = 5000 \div 35000$.

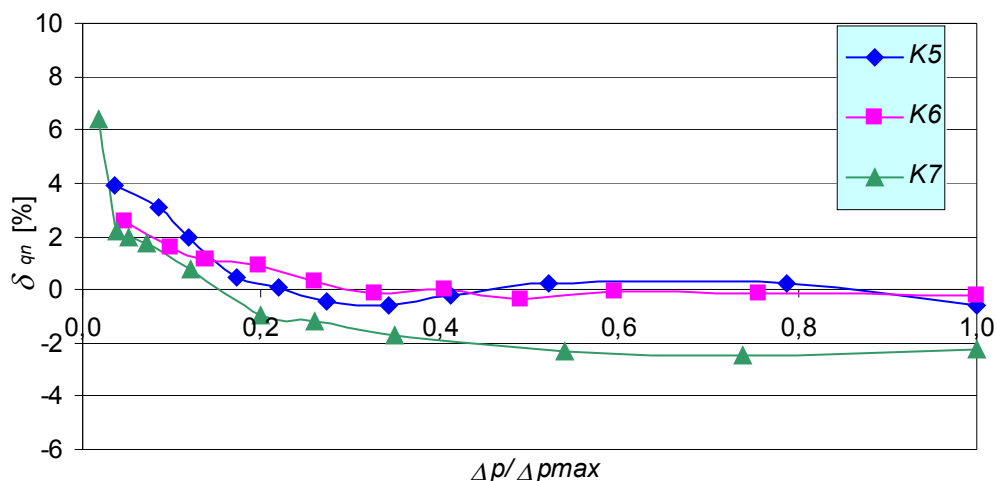


Rys. 5.36. Rozkład współczynnika przepływu przepływomierza kolanowego $C=f(Re)$ dla kolan: K5÷K7

Z przedstawionego na wykresie doświadczalnym (rys.5.36) rozkładu współczynnika przepływu przepływomierza kolanowego C wynika, że jego wartość powinna wynosić ok. 0,95 dla przepływu przejściowego określonego liczbą $Re \sim 5000$. W miarę wzrostu liczby Reynoldsa jego wartość nieznacznie wzrasta i już przy rozwiniętym przepływie turbulentnym wynosi ok. $C = 0,97$.

Z tego powodu postanowiono przeprowadzić korekcyjne obliczenia inżynierskie strumienia objętości dla wybranych kolan K5÷K7 charakteryzujących się względnym promieniem gięcia $2,3 \leq R/d \leq 2,96$ przyjmując współczynnik przepływu o wartości $C = 0,97$ zamiast $C = 1$. Wyniki obliczeń, przedstawiające względny błąd procentowy strumienia objętości między skorygowanymi obliczeniami inżynierskimi, a wynikami otrzymanymi doświadczalnie, przedstawiono w postaci wykresów (rys. 5.37).

Powstający w tym przypadku względny błąd obliczenia strumienia objętości δ_{qn} nie przekracza 2,5% dla kolan $K5$, $K6$, $K7$ w zakresie zmian bezwymiarowego przyrostu ciśnienia spiętrzenia $\Delta p/\Delta p_{max}$ od 15% do 100%.



Rys. 5.37. Procentowy rozkład względnego błędu obliczenia skorygowanego strumienia objętości δ_{qn} dla kolan: $K5 \div K7$

Zawężając zakres do wartości ciśnień spiętrzenia, dla których niepewność pomiaru ciśnienia jest porównywalna z niepewnością pomiaru strumienia, otrzymuje się wartość niepewności nie przekraczającą 0,6% dla kolana $K5$, 0,4% dla kolana $K6$ i 2,5% dla kolana $K7$.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W przedłożonej rozprawie doktorskiej przebadano dziewięć typoszeregów kolan o różnym średnim promieniu gięcia R i o dwóch różnych wewnętrznych średnicach nominalnych kanałów osiowosymetrycznych (rur) stosowanych w układach instalacji zasilania paliwem silników lotniczych. Badane kolana potraktowano jako elementy pomiarowe (krzywaki) przepływomierzy kolanowych. Pozwalają one na pomiar strumienia masy czy objętości poprzez wykorzystanie generowanego podczas przepływu cieczy mierzalnego ciśnienia spiętrzenia (powstaje różnica ciśnień między łukiem zewnętrznym „+p”, a wewnętrznym „-p” zagiętego kolana).

Wykorzystanie w technice pomiaru przepływu cieczy przepływomierzy kolanowych pozwala na minimalizację strat ciśnienia, gdyż w każdym układzie przepływowym znajduje się co najmniej jedno kolano.

Przepływomierze kolanowe charakteryzuje prosta budowa, a brak części ruchomych zapewnia im trwałość i niezawodność eksploatacyjną.

Wykonanie otworów poboru ciśnienia na dwusiecznej kąta zagięcia kolana umożliwi pomiar strumienia objętości w obu kierunkach przepływu.

Współrzędnościowe maszyny pomiarowe umożliwiają dokładny pomiar parametrów geometrycznych kolana, a w szczególności promienia krzywizny R , którego dokładność pomiaru ma duży wpływ na niepewność pomiaru strumienia masy lub objętości.

Przepływomierze kolanowe umożliwiają ciągłą kontrolę i rejestrację przepływu płynu jak również mogą znaleźć zastosowanie w automatyzacji procesu regulacji.

W celu realizacji prezentowanej metody pomiaru strumienia przepływu płynu zbudowano stanowisko doświadczalne wykorzystujące metodę wagową pomiaru strumienia, które pozwala na badania doświadczalne przepływomierzy kolanowych w zakresie liczby $Re = 5000 \div 35000$ (ograniczenie górnej granicy Re wynika z konstrukcji stanowiska).

Dla zbudowanego stanowiska wyznaczono niepewność standardową złożoną typu B strumienia objętości $U_{q_v, \%} \leq 0,12 \%$ (dla wartości strumienia $q_v \sim 0,4 \text{ dm}^3/\text{s}$), która przy wydłużaniu pomiaru czasu w trakcie wykonywania pomiaru strumienia objętości (strumienia masy) metodą wagową – maleje.

Do pomiarów ciśnienia spiętrzenia występującego podczas przepływu cieczy na kolanach przepływomierzy krzywakowych należy wykorzystywać najwyższej klasy produkowane przetworniki różnicy ciśnień (np. dla przetwornika różnicy ciśnienia typu

Yokogawa EJX 110A przy spiętrzeniach powyżej 100 Pa niepewności pomiaru strumienia objętości jest mniejsza od 1%).

Analiza wyników z przeprowadzonych badań doświadczalnych jak i otrzymanych z symulacji numerycznych pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- istnieje najkorzystniejszy, ze względu na minimalizację strat ciśnienia, przedział wartości względnego promienia krzywizny R/d , który dla przebadanych kolan zawiera się w granicach $2,3 \leq R/d \leq 2,96$ (dla przepływu turbulentnego ze wzrostem liczby Reynoldsa zastępczy współczynnik oporów miejscowych ζ dla badanych przepływomierzy kolanowych maleje i np. dla $Re = 33000$ w tym przedziale wynosi $\zeta > 0,6$),
- dla przepływu turbulentnego istnieje kolano, dla którego rozkład ciśnienia spiętrzenia jest praktycznie niezależny od punktów poboru ciśnienia, jeżeli usytuowano je w pobliżu dwusiecznej kąta zagięcia kolana 90° (dla kolana $K6$ o względnym promieniu gięcia $R/d = 2,74$ uzyskano porównywalne co do wartości ciśnienia spiętrzenia między otworami impulsowymi wykonanymi na łuku wewnętrznym w granicach do $\pm 10^\circ$, a na łuku zewnętrznym do $\pm 15^\circ$ od dwusiecznej kąta zagięcia kolana),
- nierównomierność rozkładu względnego przyrostu ciśnienia spiętrzenia jest najmniejsza dla kolana $K6$ i wynosi $\delta_{\Delta p} < |6,1\%|$ w zakresie zmiany punktu pomiarowego na łuku zewnętrznym w granicach $\pm 25^\circ$ od dwusiecznej kąta zagięcia kolana,
- najmniejsze wartości odchyłki względnego przyrostu ciśnienia spiętrzenia $\Delta\delta_{\Delta p}$ występują dla kolana $K6$ (przy liczbie $Re = 17600$ odchyłka $\Delta\delta_{\Delta p} \leq 10,4\%$ i maleje do wartości $\Delta\delta_{\Delta p} \leq 3,9\%$ przy $Re = 35000$),
- względny błąd między obliczeniami inżynierskimi strumienia objętości, a wynikami uzyskanymi doświadczalnie nie przekracza 4,2% dla kolan o względnym promieniu gięcia R/d z zakresu od 2,3 do 3,53 przy zmianie wartości bezwymiarowego przyrostu ciśnienia spiętrzenia $\Delta p / \Delta p_{\max}$ w zakresie 20÷100%,
- względny błąd między skorygowanymi obliczeniami inżynierskimi strumienia objętości (dla $C=0,97$), a wynikami uzyskanymi doświadczalnie nie przekracza 2,5% dla kolan o względnym promieniu gięcia R/d z zakresu od 2,3 do 2,96 przy zmianie wartości bezwymiarowego przyrostu ciśnienia spiętrzenia $\Delta p / \Delta p_{\max}$ w zakresie 15÷100%,

- dla ciśnienia spiętrzenia $\Delta p / \Delta p_{\max}$ w zakresie 30-100% uzyskano niepewność pomiaru 0,6% dla kolan *K5* i 0,4% dla kolan *K6*,
- dla przepływomierza z kolaniem *K6* występuje najmniejsza rozbieżność między porównywanymi wynikami uzyskanymi w badaniach doświadczalnych, a wynikami symulacji numerycznej *3D k-ε* (względny błąd symulacji ciśnienia spiętrzenia nie przekracza 5,1% dla punktów impulsowych poboru ciśnienia *C-5* usytuowanymi na dwusiecznej kąta zagięcia kolana i stosowanymi w praktyce inżynierskiej),
- względny przyrost odchyłki okrągłości $(\Delta Z_{B-B} - \Delta Z_{A-A}) / \Delta Z_{A-A}$ w przebadanych przekrojach maleje ze wzrostem względnego promienia gięcia R/d i średnicy wewnętrznej d kanału osiowosymetrycznego (np. dla kolana o względnym promieniu gięcia $R/d = 1,7$ (*K1*) wynosi 7,3),
- owalizacja przekroju poprzecznego na dwusiecznej zagięcia kolana maleje ze wzrostem względnego promienia gięcia R/d (np. dla kolana *K1* jest ponad 8 razy większa niż w przekroju przed zagięciem),
- by wyeliminować w trakcie badań zmianę zakresu pomiarowego przetwornika różnicy ciśnień, należy zastosować dwa przetworniki różnicy ciśnień z których jeden do pomiarów przepływu w dolnym, a drugi w górnym zakresie badanego strumienia masy wody określonego liczbą Reynoldsa,
- ze wzrostem względnego promienia gięcia R/d maleje wartość ciśnienia spiętrzenia między łukiem zewnętrznym, a łukiem wewnętrznym zagiętego kolana,
- rozkład względnego przyrostu ciśnienia spiętrzenia $\delta_{\Delta p}$ (nie jego wartość) dla turbulentnego przepływu cieczy nie zależy od liczby Re lecz od wartości względnego promienia gięcia kolana R/d ,
- dla przepływu turbulentnego wartość odchyłki względnego przyrostu ciśnienia spiętrzenia $\Delta \delta_{\Delta p}$ zależy od względnego promienia gięcia R/d (badanego kolana) i jej wartość maleje ze wzrostem liczby Reynoldsa,
- z przeprowadzonych obliczeń numerycznych wynika, że model *3D k-ε* najlepiej odzwierciedla kształty i wartości rozkładu ciśnienia spiętrzenia wzdłuż punktów jego poboru na łuku zewnętrznym.

BIBLIOGRAFIA

1. Adamczak S.: Pomiary geometryczne powierzchni. WNT, Warszawa 2008
2. Andruszkiewicz J., Górecki J., Kubas K.: Pomiary strumienia cieczy za pomocą bezwładnościowego przepływomierza kolanowego. Materiały konferencyjne XXXV MKM, Kraków 2003, s. 111-114
3. Andruszkiewicz J., Godlewski T., Górecki J., Kubas K.: Pomiary strumienia cieczy za pomocą przepływomierzy uśredniających ciśnienie dynamiczne i bezwładnościowych. PAK vol.53, nr 9/2007, s. 58-60
4. Arendarski J.: Niepewność pomiarów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003
5. Barzykowski J.: Współczesna metrologia zagadnienia wybrane. WNT, Warszawa 2004
6. Bean H.S.: Fluid Meters. Their Theory and Application Sixth Edition. ASME, New York 1971
7. Bendat J., Piersol A.: Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych. PWN, Warszawa 1976
8. Bennett C.O., Myers J.E.: Przenoszenie pędu, ciepła i masy. WNT, Warszawa 1967
9. Boryczko A.: Podstawy pomiarów wielkości mechanicznych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2010
10. Brandt S.: Analiza danych. PWN, Warszawa 1998
11. Broszko M.: Hydromechanika. PWN, Warszawa 1953
12. Bukowski J.: Mechanika płynów. PWN, Warszawa 1976
13. Cengel Y.A., Cimbala J.M.: Fluid Mechanics. McGraw-Hill, New York 2009
14. Ciałkowski M.: Mechanika płynów. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2008
15. Dobrowolski B., Kabza Z.: Teoretyczna analiza wpływu osiowosymetrycznej deformacji pola prędkości i zawirowania strugi na właściwości metrologiczne zwęzek pomiarowych. Studia i Monografie z. 59, Wyższa Szkoła Inżynierska w Opolu, Opole 1992
16. Duckworth R.A.: Mechanika płynów. WNT, Warszawa 1983
17. El-Gammal M., Mazhar H., Cotton J.S., Shefski C., Pietralik J., Ching C.Y.: The hydrodynamic effects of single-phase flow on flow accelerated corrosion in a 90-degree elbow. Nuclear Engineering and Design 240 (2010) s. 1589-1598
18. Elsner J.W.: Turbulencja przepływów. PWN, Warszawa 1987
19. Fluent 6.3 User's Guide. Fluent Inc, 2006
20. Główny Urząd Miar: Wyrażanie niepewności pomiaru – przewodnik. Warszawa 1999
21. Gondek A., Sztaba G.: Analiza numeryczno-doświadczalna przepływomierzy kolanowych. PAR 1/2011, s. 54-58
22. Górecki J., Andruszkiewicz J., Kubas K.: Pomiary strumieni przepływów w rurociągach o dużych średnicach. Energetyka, z.2/2006, s. 88-91

23. Grabarczyk C.: Przepływy cieczy w przewodach. Metody obliczeniowe. Envirotech, Poznań 1997
24. Grajper P., Smółka J.: Eksperymentalne i numeryczne określenie miejscowych strat ciśnienia w kolanach 90° instalacji wodociągowych. Gaz, woda i technika sanitarna 2010, nr 7-8, s. 13-19.
25. Jeżowiecka-Kabsch K., Szewczyk H.: Mechanika płynów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001
26. Kabza Z.: Pomiary strumienia płynów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 1996
27. Kabza Z., Kostyrko K.: Metrologia mikroklimatu, pomieszczenia i środowiskowych wielkości fizycznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2003
28. Kalus-Jęcek B., Kuśmierk Z.: Wzorce wielkości elektrycznych i ocena niepewności pomiaru. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2006
29. Karta Katalogowa: Flow Measurement SITRANS FM TRANSMAG 2. SIEMENS 2011
30. Kazimierski Z.: Podstawy mechaniki płynów i metod komputerowej symulacji przepływów. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2004
31. Kornacki J., Mielniczuk J.: Statystyka dla kierunków technicznych i przyrodniczych. WNT, Warszawa 2001
32. Korzemiński J.W.: Gięcie rur cienkościennych. WNT, Warszawa 1971
33. Kosma Z.: Podstawy mechaniki płynów. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2007
34. Kotlewski F., Mieszkowski M.: Pomiary w technice cieplnej. WNT, Warszawa 1974
35. Kremlevski P.P.: Raschodomery i sčétčiki količestva veščestv. Izd. Mašinstroenie, Leningrad 1989
36. Laudański L. M.: Statystyka nie tylko dla licencjatów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004
37. Łazarkiewicz S., Troskolewski A.T.: Pompy wirowe. PWT, Warszawa 1959
38. Matras Z.: Podstawy mechaniki płynów i dynamiki przepływów cieczy nienewtonowskich. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006
39. Mielcarzewicz E.: Obliczenia hydrauliczne układów wodociągowych. Arkady, Warszawa 1965
40. Mitosek M.: Mechanika płynów w inżynierii i ochronie środowiska. Wyd. WPW 2005
41. Orzechowski Z., Prywer J., Zarzycki R.: Mechanika płynów w inżynierii środowiska. WNT, Warszawa 2001
42. Ozimek E.: Podstawy teoretyczne analizy widmowej sygnałów. PWN, Poznań 1985
43. Piastun E., Stańda J.: Pomiary ilości oraz strumienia masy i objętości przepływających płynów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006
44. Piotrowski J.: Pomiary, czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego. WNT, Warszawa 2009
45. Piotrowski J., Kostyrko K.: Wzorcowanie aparatury pomiarowej. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000

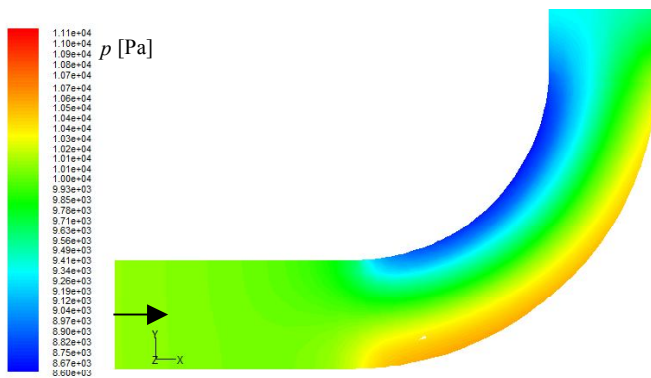
46. Pospolita J.: Pomiary strumienia płynów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2004
47. PN-EN 24185:1999.: Pomiar strumienia objętości cieczy w przewodach. Metoda wagowa
48. Prataap R.: Matlab 7 dla naukowców i inżynierów. PWN, Warszawa 2009
49. Ratajczyk E.: Współrzędnościowa technika pomiarowa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005
50. Reymann Z., Steller K.: Przepływomierz krzywakowy. Zeszyty Naukowe IMP PAN, Studia i Materiały, 50/949/79, Gdańsk 1979
51. Romer E.: Miernictwo przemysłowe. PWN, Warszawa 1978
52. Rumszyski L.Z.: Matematyczne opracowanie wyników eksperymentu. WNT, Warszawa 1973
53. Rup K., Malinowski Ł.: Metoda pomiaru strumienia objętości płynu w zastosowaniach do przepływomierzy kolanowych. PAK 5/2005, s. 35-37
54. Rup K., Malinowski Ł.: Metoda pomiaru strumienia objętości płynu w zastosowaniach do przepływomierzy kolanowych. Chemical and Proces Engineering, nr 27, s.803-816, 2006
55. Rup K., Soczówka M.: Zastosowanie wybranych modeli turbulencji do obliczeń opływu walca. Czasopismo Techniczne z. 2-M/2001, s. 34-53, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1998
56. Skubis T.: Opracowanie wyników pomiarów. Przykłady, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003
57. Skubis T.: Podstawy metrologicznej interpretacji pomiarów. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004
58. Soczówka M.: Zastosowanie wybranych modeli turbulencji do obliczeń opływu płyty. Czasopismo Techniczne z. 2-M/2001, s. 54-65, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1998
59. Stańda J., Górecki J., Andruszkiewicz A.: Badanie maszyn i urządzeń energetycznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004
60. Starzyński W.: Statystyka praktyczna. PWN, Warszawa 2000
61. Strzałkowski A., Śliżyński A.: Matematyczne metody opracowania wyników pomiarów. PWN, Warszawa 1981
62. Talar D., Sokołowski J.: Pomiary cieplne (zweźkowe) w przemyśle. Agenda Wydawnicza PAK, Warszawa 2006
63. Taylor J. R.: Wstęp do analizy błęd pomiarowego. PWN, Warszawa 1999
64. Troskoleński A.T.: Hydromechanika. WNT, Warszawa 1967
65. Troskoleński A.T.: Hydromechanika techniczna. Tom III Pomiary wodne. PWT, Warszawa 1957
66. Tu J.: Computational fluid dynamics. A practical approach. McGraw-Hill, New York 2007
67. Tuliszka E.: Mechanika płynów. PWN, Warszawa 1980

68. Turkowski M.: Przemysłowe sensory i przetworniki pomiarowe. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000
69. Turzeniecka D.: Ocena niepewności wyniku pomiarów. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997
70. Ulusarslan D.: Determination of the loss coefficient of elbows in the flow of low-density spherical capsule train. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32 (2007), s. 415-422
71. Walczak J.: Inżynierska mechanika płynów. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006
72. Wojciechowski J.: Pomiary w elektrowniach cieplnych. PWT, Warszawa 1958
73. Zakrzewski J.: Czujniki i przetworniki pomiarowe. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004
74. Zieliński T. P.: Od teorii do cyfrowego przetwarzania sygnałów. Wydawnictwo AGH, Kraków 2002

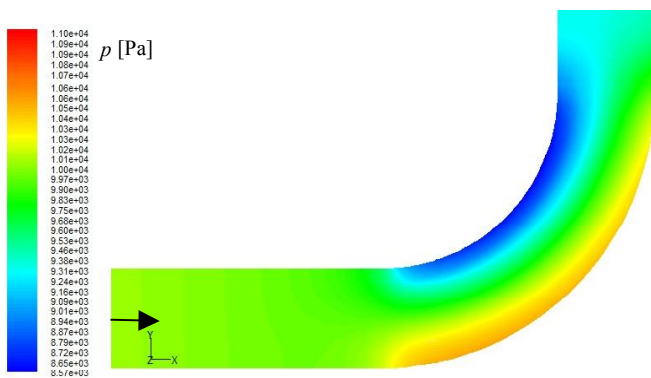
ZAŁĄCZNIK A
SYMULACJE NUMERYCZNE WYBRANYCH PRZEPLYWOMIERZY
KOLANOWYCH

Na rysunkach A.1 do A.15 przedstawiono dla liczby $Re = 30600$ wyznaczone numerycznie w oprogramowaniu FLUENT 6.3 symulacyjne rozkłady ciśnienia statycznego w płaszczyźnie zagięcia kolana dla wybranych przepływomierzy przy różnych wariantach modelowania przepływu wody ($3D k-\omega$, $3D k-\varepsilon$, $3D LES$).

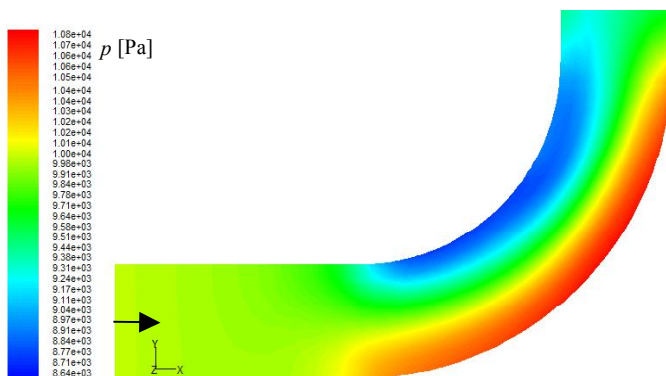
Na rysunkach A.1 do A.3 przedstawiono rozkład ciśnienia statycznego dla kolana przepływomierza *K5* bez otworów impulsowych poboru ciśnienia dla standardowych modeli przepływu.



Rys. A.1. Rozkład ciśnienia statycznego w kolanie *K5* dla modelu $3D k-\omega$ (dla liczby $Re = 30600$)

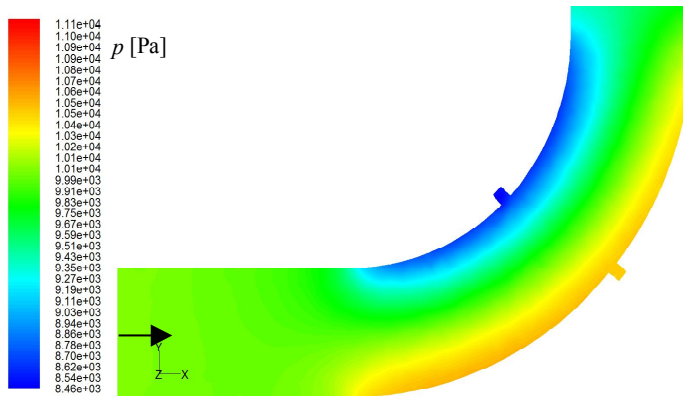


Rys. A.2. Rozkład ciśnienia statycznego w kolanie *K5* dla modelu $3D k-\varepsilon$ (dla liczby $Re = 30600$)

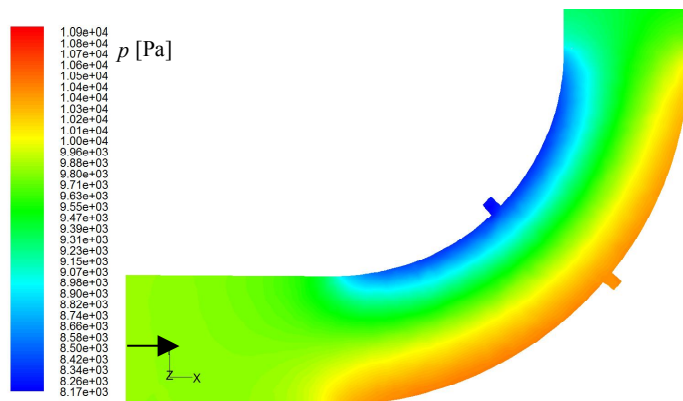


Rys. A.3. Rozkład ciśnienia statycznego w kolanie *K5* dla modelu $3D LES$ (dla liczby $Re = 30600$)

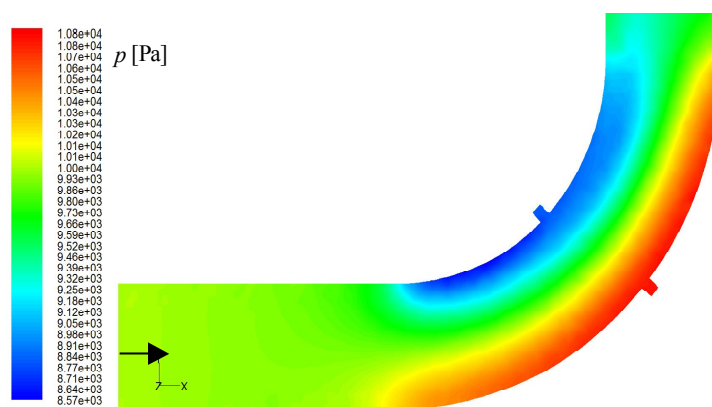
Na rysunkach A.4 do A.6 przedstawiono rozkład ciśnienia statycznego w płaszczyźnie zagięcia kolana przepływomierza K5 dla wybranych standardowych modeli przepływu turbulentnego. W kolanie przepływomierza wykonano dwa otwory impulsowe poboru ciśnienia o średnicy 1,5 mm każdy. Jeden otwór wykonano na wewnętrznym łuku kolana na dwusiecznej kąta zagięcia, a drugi na łuku zewnętrznym przesunięty o 5° kątowych wzdłuż kierunku przepływu wody.



Rys. A.4. Rozkład ciśnienia statycznego w kolanie K5 dla modelu 3D $k-\omega$ (dla liczby $Re = 30600$ z 2 otworami)

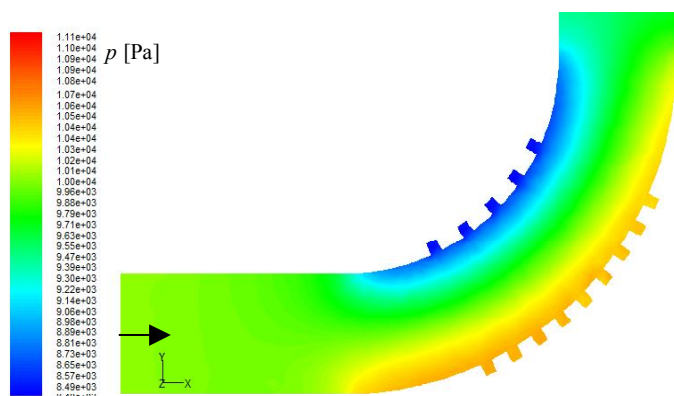


Rys. A.5. Rozkład ciśnienia statycznego w kolanie K5 dla modelu 3D $k-\epsilon$ (dla liczby $Re = 30600$ z 2 otworami)

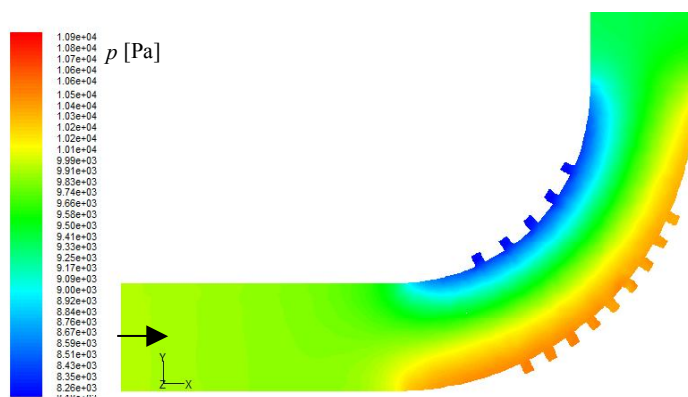


Rys. A.6. Rozkład ciśnienia statycznego w kolanie K5 dla modelu 3D LES (dla liczby $Re = 30600$ z 2 otworami)

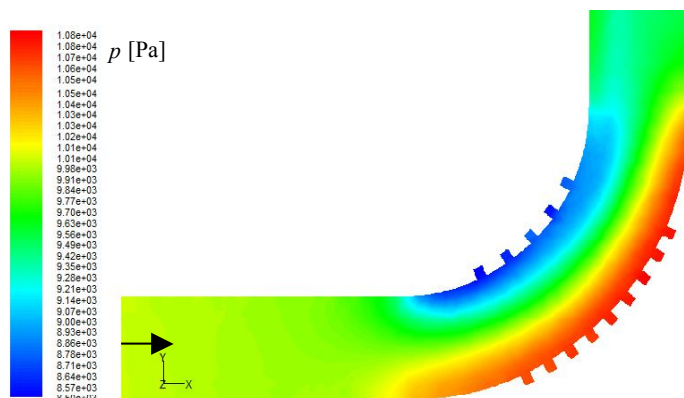
Na rysunkach A.7 do A.9 przedstawiono rozkład ciśnienia statycznego w płaszczyźnie zagięcia kolana przepływomierza K5 dla wybranych standardowych modeli turbulентnego przepływu wody. W kolanie przepływomierza wykonano czternaście otworów impulsowych poboru ciśnienia o średnicy 1,5 mm każdy. Pięć otworów wykonano na wewnętrznym łuku kolana co 10° stopni kątowych, a dziewięć na łuku zewnętrznym co 5° kątowych. Otwory rozmieszczono symetrycznie względem dwusiecznej kąta zagięcia kolana zgodnie z rysunkiem 3.3.3.



Rys. A.7. Rozkład ciśnienia statycznego w kolanie K5 dla modelu $3D k-\omega$ (dla liczby $Re = 30600$ z 14 otworami)



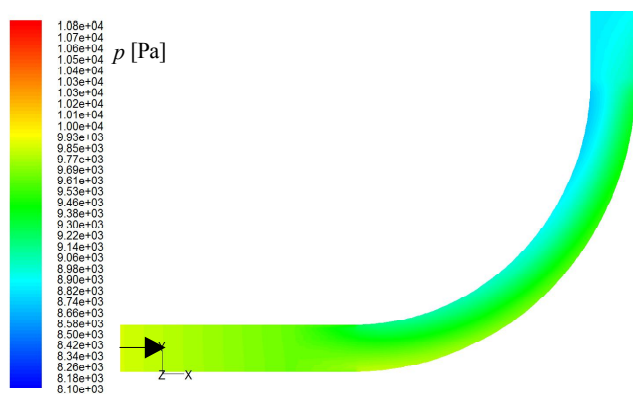
Rys. A.8. Rozkład ciśnienia statycznego w kolanie K5 dla modelu $3D k-\epsilon$ (dla liczby $Re = 30600$ z 14 otworami)



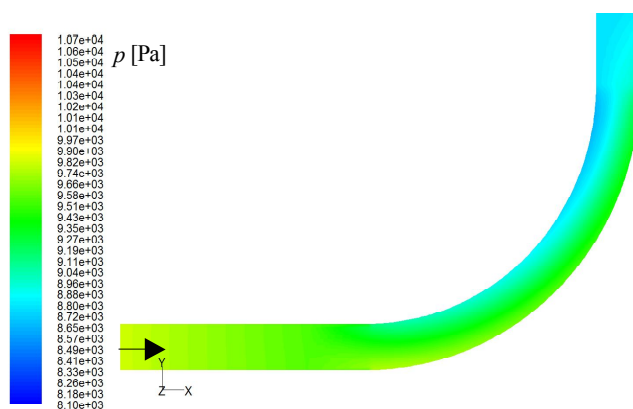
Rys. A.9. Rozkład ciśnienia statycznego w kolanie K5 dla modelu $3D LES$ (dla liczby $Re = 30600$ z 14 otworami)

Na rysunkach A.10 do A.15 przedstawiono rozkład ciśnienia statycznego w płaszczyźnie zagięcia kolana przepływomierza *K8* dla trzech wybranych standardowych modeli przepływu płynu: *3D k- ω* , *3D k- ϵ* , *3D LES*.

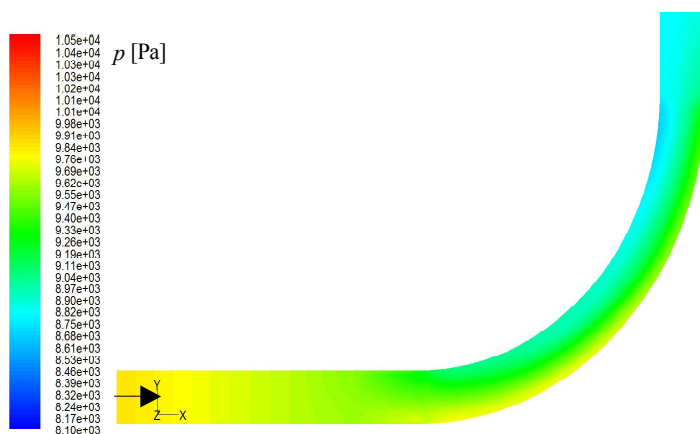
Na rysunkach A.10 do A.12 przedstawiono rozkład ciśnienia statycznego dla kolana przepływomierza *K8* bez wykonanych otworów impulsowych poboru ciśnienia.



Rys. A.10. Rozkład ciśnienia statycznego w kolanie *K8* dla modelu *3D k- ω* (dla liczby $Re = 30600$)

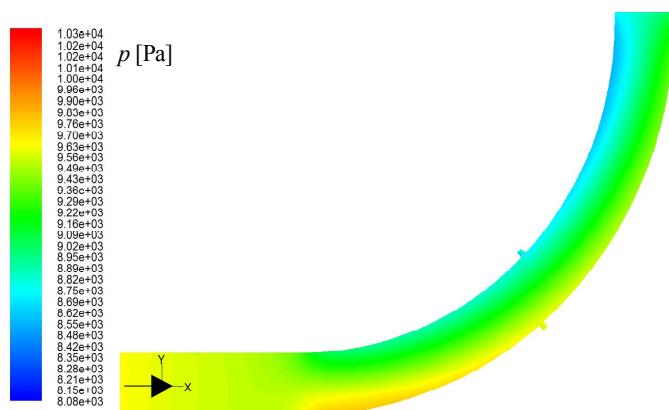


Rys. A.11. Rozkład ciśnienia statycznego w kolanie *K8* dla modelu *3D k- ϵ* (dla liczby $Re = 30600$)

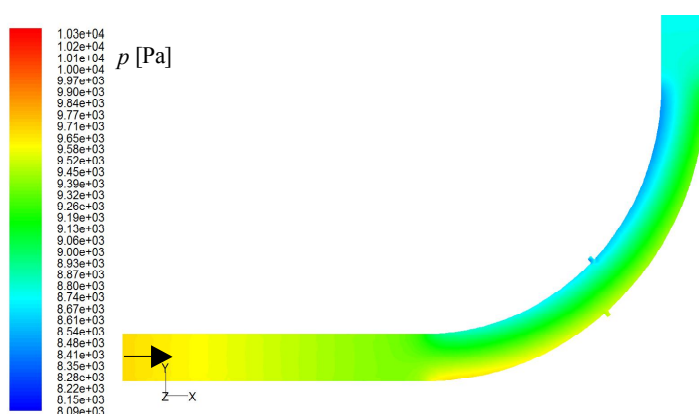


Rys. A.12. Rozkład ciśnienia statycznego w kolanie *K8* dla modelu *3D LES* (dla liczby $Re = 30600$)

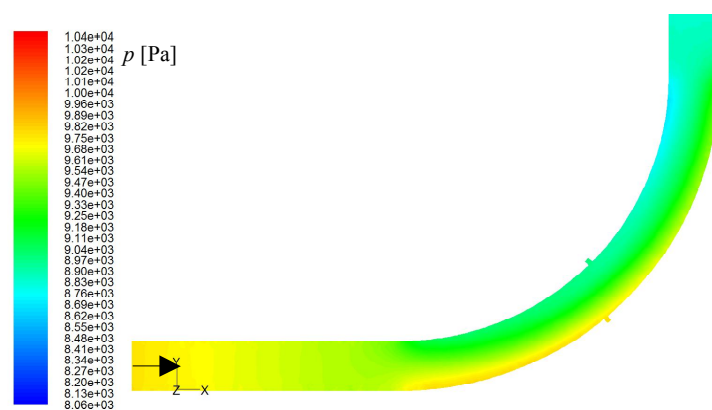
Na rysunkach A.13 do A.15 przedstawiono rozkład ciśnienia statycznego w płaszczyźnie zagięcia kolana przepływomierza K8 dla wybranych standardowych modeli przepływu turbulentnego. W kolanie przepływomierza wykonano dwa otwory impulsowe poboru ciśnienia o średnicy 1,5 mm każdy. Jeden otwór wykonano na wewnętrznym łuku kolana na dwusiecznej kąta zagięcia. Drugi z otworów wykonano na łuku zewnętrznym od strony napływającej wody, 5° kątowych przed dwusieczną kąta zagięcia kolana.



Rys. A.13. Rozkład ciśnienia statycznego w kolanie K8 dla modelu $3D k-\omega$ (dla liczby $Re = 30600$ z 2 otworami)



Rys. A.14. Rozkład ciśnienia statycznego w kolanie K8 dla modelu $3D k-\epsilon$ (dla liczby $Re = 30600$ z 2 otworami)



Rys. A.15. Rozkład ciśnienia statycznego w kolanie K8 dla modelu $3D LES$ (dla liczby $Re = 30600$ z 2 otworami)