

POLITECHNIKA OPOLSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

KATEDRA TECHNIKI CIEPLNEJ I APARATURY PRZEMYSŁOWEJ



**Wpływ zaburzenia strugi na charakterystyki
przepływomierzy uśredniających ciśnienie dynamiczne**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Opracował: mgr inż. Sławomir Pochwała

Promotor: prof. dr hab. inż. Janusz Pospolita

Opole 2014

Składam podziękowania prof. dr hab. inż. Januszowi Pospolita
za pomoc i uwagi merytoryczne w trakcie realizacji pracy doktorskiej.

Dziękuję również dr inż. Mirosławowi Kabacińskiemu
za pomoc w przygotowaniu i eksploatacji stanowiska badawczego.

SPIS TREŚCI

1. WYKAZ OZNACZEŃ.....	7
2. STAN BADAŃ ZWIĄZANYCH Z BUDOWĄ I STOSOWANIEM PRZEPLYWOMIERZY Z SONDAMI UŚREDNIAJĄCYMI CIŚNIENIE DYNAMICZNE.....	9
2.1 Budowa i zasada działania przepływomierza z sondą uśredniającą ciśnienie dynamiczne....	9
2.2 Konstrukcje przepływomierzy.....	13
2.3 Zagadnienia związane z budową sond	17
2.4 Zagadnienia związane z instalacją i eksploatacją sond	23
3. CEL, ZAKRES I TEZA PRACY	34
4. BUDOWA STANOWISKA POMIAROWEGO I METODYKA POMIARÓW	35
4.1 Opis stanowiska.....	35
4.2 Sposób akwizycji danych pomiarowych	43
5. NIEPEWNOŚĆ WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKA PRZEPLYWU K BADANYCH PRZEPLYWOMIERZY	47
6. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH I ICH ANALIZA.....	51
6.1 Wyniki badań eksperymentalnych	51
6.1.1 Wyniki badań analizowanych konstrukcji sond piętrzących w warunkach zaburzonego przepływu kolanem segmentowym 3x30°	54
6.1.2 Wyniki badań analizowanych konstrukcji sond piętrzących w warunkach zaburzonego przepływu układem kolan segmentowych w różnych płaszczyznach	69
6.1.3 Wyniki badań analizowanych konstrukcji sond piętrzących w warunkach zaburzonego przepływu przepustnicą w pełni otwartą	86
6.1.4 Wyniki badań analizowanych konstrukcji sond piętrzących w warunkach zaburzonego przepływu przepustnicą otwartą w 50%.....	101
7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	115
8. LITERATURA	118
9. SPIS RYSUNKÓW	124
10. SPIS TABEL.....	129
Załącznik 1	130
Załącznik 2	136
Załącznik 3	145
Załącznik 4	148
Załącznik 5	151
Załącznik 6	154

WSTĘP

Pomiary strumieni płynów należą, obok pomiarów temperatury i ciśnienia, do jednych z najczęstszych zarówno w przemyśle jak i w innych sferach działalności gospodarczej. Różnorodność problemów technicznych, mediów których strumień znać należy oraz skala mierzonych wielkości spowodowała, że rodzajów przepływomierzy jest wiele. Ich działanie opiera się na bardzo różnych podstawach fizykalnych. Ich pierwsze historyczne zastosowania dotyczyły spraw rozliczeniowych, głównie poboru w wielu miejscach bardzo cennej wody [73]. Sfera handlu i stosowanych w rozliczeniach przepływomierzy jest bardzo szeroka. Dotyczy to głównie różnego typu paliw płynnych i gazowych, dostaw dla odbiorców komunalnych i przemysłowych ciepła oraz wody, jak również rozliczania ilości zrzucanych ścieków. Niejednokrotnie strumienie liczone są w stekach tysięcy m³ czynnika na godzinę, a średnice rurociągów są rzędu 1÷2 i więcej metrów. Stwarza to określone problemy w doborze odpowiednich przepływomierzy i ich montażu. Pomiary rozliczeniowe wymagają względnie jak najmniejszej niepewności pomiaru. To wymaganie niejednokrotnie zaważyło grupę branych pod uwagę przepływomierzy. Odrębną sprawą jest porozumienie między dostawcą i odbiorcą, co do przyjętej metody pomiaru strumienia. Stąd też wypływa potrzeba istnienia i stosowania różnych dokumentów normatywnych. Drugim, równie ważnym obszarem zastosowań przepływomierzy jest przemysł i to nie tylko energetyka czy chemia, ale również przemysł spożywczy, przetwórstwa produktów rolnych czy farmaceutyczny, gdzie nie tylko ważny jest ciągły pomiar strumienia, ale również precyzyjne dozowanie różnych cieczy czy gazów. W prowadzeniu procesów technologicznych ograniczenie niepewności pomiaru jest tak samo ważne jak przy wszelkiego rodzaju innych pomiarach. Nie mniej jednak ich powszechność i ocena prawidłowości przebiegu procesu od powtarzalności wskazań jest często podstawą kontroli technologii produkcji. Wynika to niejednokrotnie z faktu, że możliwość zabudowy przepływomierza w układzie przepływowym nie pozwala na spełnienie warunków instalacyjnych i eksploatacyjnych, których wymaga producent urządzenia pomiarowego. Ich spełnienie stwarza warunki pozwalające zastosować charakterystyki metrologiczne przyrządów wynikające z prac wzorcowniczych.

Bardzo liczną grupę przepływomierzy, od dawna stosowanych w praktyce przemysłowej stanowią przepływomierze piętzące [22, 25, 33, 38, 66, 71]. Wśród nich

najliczniejszą grupę stanowią zwężki pomiarowe, obszernie zbadane i znormalizowane od kilkudziesięciu lat. Ich zaletą jest, prócz znanych i udokumentowanych charakterystyk metrologicznych, brak ruchomych części i przede wszystkim odporność na wysokie temperatury. Ta cecha stanowi istotną przewagę, gdyż wysokie, zwłaszcza ekstremalne temperatury w przepływach par i gazów, eliminują praktycznie inne rodzaje przepływomierzy. Wadą zwęzek jako organów deprimogenicznych jest stwarzanie dodatkowych oporów przepływu. Nawet jeśli te opory są względnie niewielkie, rzędu ułamków kilopascali, to przy przepływach rzędu kilkudziesięciu- kilkuset tysięcy m³ na godzinę dodatkowe moce przetłaczania płynów są znaczne. Stąd koncepcja, aby zamiast pomiaru zwężkowego zastosować alternatywny pomiar uśredniającą sondą spiętrzającą [11, 24, 25, 33]. Tego rodzaju przepływomierz praktycznie nie wprowadza dodatkowych oporów przepływu. W takich przepływomierzach sygnałem pomiarowym jest różnica ciśnień mierzona na opływowej sondzie. Niejednokrotnie sygnał ten, zwłaszcza przy przepływie gazów, przy względnie niskich gęstościach i prędkościach, ma wartość małą, czasem rzędu kilku- kilkunastu pascali. Ten fakt, jak również brak dokumentów normatywnych co do warunków realizacji pomiarów, nie sprzyjał rozpowszechnieniu tej metody pomiaru strumieni. Mimo, że metoda i jej podstawy teoretyczne znane były od wielu lat [57, 73, 77], dopiero w latach 90-tych szerzej weszła do praktyki przemysłowej. Wiązało się to w dużym stopniu z rozwojem i zdecydowaną poprawą własności metrologicznych przetworników różnicy ciśnień. Zastosowanie nowoczesnych materiałów na membrany w celach pomiarowych oraz techniki mikroprocesorowej spowodowało obniżenie o rząd niepewności pomiaru. Wówczas pomiary nawet niewielkich różnic ciśnień mogły zapewnić wystarczająco niską niepewność pomiarów strumieni.

Niepodważalną zaletą przepływomierzy z sondami uśredniającymi ciśnienie dynamiczne jest względnie łatwy ich montaż, co jest ewidentne w przypadku rurociągów o dużych średnicach. Metoda rozpowszechniła się zwłaszcza w energetyce, ciepłownictwie oraz w przemyśle chemicznym, gdzie pomiary strumieni dotyczą różnych mediów: powietrza do procesu spalania, spalin, pary wodnej, gazu ziemnego, wielkopieczowego, konwertorowego czy koksowniczego, innych gazów, wody zimnej i gorącej.

Złożoność budowy wielu obiektów np. współczesnych urządzeń kotłowych, sposób zagospodarowania w nich przestrzeni jest przyczyną, że niejednokrotnie brak jest miejsca, w którym zgodnie z zaleceniami producenta można zainstalować przepływomierz. Najczęściej wiąże się to z zapewnieniem odpowiednio długich prostych odcinków rurociągu

przed i za przepływomierzem. Długości te zależą przede wszystkim od rodzaju elementu zaburzającego przepływ, znajdującego się przed przepływomierzem. Niespełnienie tych warunków zwiększa niepewność pomiaru ponad gwarantowaną przez producenta przepływomierza.

W szeregu przypadków, zwiększenie niepewności pomiaru o kilka procent (np. 2÷5%) dyskwalifikuje metodę pomiaru strumienia w wielu technologiach, dodawaniu substratów, nie mówiąc o rozliczeniach czynnika. Jednak, w wielu przypadkach, w regulacji i kontroli procesów przemysłowych np. rozdziału powietrza w obrębie urządzenia kotłowego, tego rzędu niepewność jest do przyjęcia. Ważna jest jednak powtarzalność wskazań przyrządów pomiarowych. Podobnie jest w przypadku wielu innych układów kontroli i sterowania procesami spalania. Stąd też wiedza na temat charakterystyk pomiarowych przepływomierzy w warunkach instalacyjnych odbiegających od wymaganych przez producenta jest niejednokrotnie bardzo przydatna. Może dać odpowiedź, co do rzędu i znaku dodatkowej niepewności pomiaru. Ta informacja, z kolei, może kwalifikować lub dyskwalifikować przepływomierz jako urządzenie pomiarowe lub też element układu regulacji w instalacji przepływowej.

Powyższe spostrzeżenia i uwagi były podstawą sprecyzowania tematu pracy doktorskiej. Z przyczyn podniesionych powyżej w badaniach wzięto pod uwagę przepływomierze z sondami uśredniającymi różnicę ciśnień. Przyjęty zakres badań ma swoje uzasadnienie w praktyce przemysłowej.

1. WYKAZ OZNACZEŃ

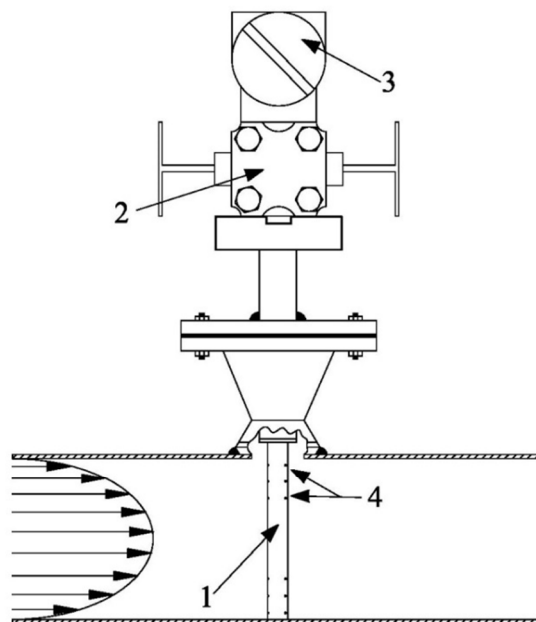
Symbol	Znaczenie	Jednostka
a	wymiar charakterystyczny przepustnicy	mm
b	wymiar charakterystyczny przepustnicy	mm
c	wymiar charakterystyczny przepustnicy	mm
d_0	średnica otworka piezometrycznego	mm
e	wymiar charakterystyczny przepustnicy	mm
f	wymiar charakterystyczny przepustnicy	mm
g	wymiar charakterystyczny przepustnicy	mm
i	numer kolejnego otworka impulsowego	-
j	ilość otworów w przepustnicy	szt.
l	wymiar charakterystyczny przepustnicy	mm
m	wykładnik zależny od liczny Re	-
n	liczba otworków rurki uśredniającej po stronie napływowej lub odpływowej	-
n_p	liczba branych pod uwagę pomiarów	-
p+	nadciśnienie płynu odbierane przez sondę spiętrzającą	Pa
p-	podciśnienie płynu odbierane przez sondę spiętrzającą	Pa
r	promień bieżący	mm
r_p	współrzędna promieniowa	mm
r_i	promień i-tego otworu	mm
w	prędkość przepływu potencjalnego (niezakłóconego)	m/s
$w_{\text{śr}}$	prędkość średnia w rurociągu	m/s
w_{max}	prędkość maksymalna w rurociągu	m/s
x	współrzędna odpowiadająca wielokrotności średnic od elementu zaburzającego	-
q_v	strumień objętości płynu	m ³ /h
A	wymagany odcinek prosty przed przepływomierzem	mm
B	wymagany odcinek prosty za przepływomierzem	mm
A_r	pole przekroju rurociągu	m ²
A'	wymagany odcinek prosty przed przepływomierzem po zastosowaniu prostownicy strumienia	mm
C	wymagany odcinek prosty od końca prostownicy strumienia do przepływomierza	mm
C'	wymagany odcinek prosty od elementu zaburzającego do końca przepustnicy	mm
D	średnica wewnętrzna rurociągu	mm
DN	średnica nominalna	mm
Dp	wymiar charakterystyczny przepustnicy	mm

Symbol	Znaczenie	Jednostka
Dz	średnica zewnętrzna kolana	mm
K	współczynnik przepływu	-
$K_{\text{sr}/D}$	wartość współczynnika przepływu uśredniona dla całego zakresu analizowanych prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego	-
$K_{\text{sr}20}$; $K_{\text{sr}35}$	wartość współczynnika przepływu uśredniona dla całego zakresu analizowanych prędkości, dla położenia w którym profil prędkości przyjęto jako w pełni rozwinięty	-
L_2	wymiar charakterystyczny kolana	mm
R	uniwersalna stała gazowa	J/mol·K
Re	liczba Reynoldsa	-
R_w	promień wewnętrzny rurociągu	mm
T	temperatura	K
U_{min}	prędkość minimalna w przekroju przepływowym	m/s
Z	współczynnik wzmocnienia	-
Z_1	wymiar charakterystyczny kolana	mm
Z_2	wymiar charakterystyczny kolana	mm
Δp	ciśnienie różnicowe	Pa
α	wymiar charakterystyczny kolana	°
$\delta(\dots)$	niepewność pomiaru	%
δK	niepewność wyznaczania współczynnika przepływu	%
δK_{lok}	niepewność dodatkowa współczynnika przepływu związana z lokalizacją przepływomierza	%
ν	kinematyczny współczynnik lepkości	m ² /s
ρ	gęstość płynu	kg/m ³
Δp	ciśnienie różnicowe	Pa
ΔK	zmiana współczynnika przepływu w funkcji odległości	%

2. STAN BADAŃ ZWIĄZANYCH Z BUDOWĄ I STOSOWANIEM PRZEPLYWOMIERZY Z SONDAMI UŚREDNIAJĄCYMI CIŚNIENIE DYNAMICZNE

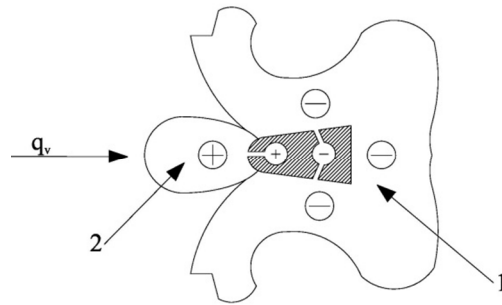
2.1 Budowa i zasada działania przepływomierza z sondą uśredniającą ciśnienie dynamiczne

Podstawowym elementem przepływomierza z sondą uśredniającą ciśnienie dynamiczne jest kształtka (rurka) z odpowiednio usytuowanymi otworami służącymi do odbioru ciśnienia. Kształtka wmontowana jest w przestrzeni pomiarowej (rurociągu). Podczas opływu czujnika ciśnienie w części czołowej, ze względu na oddziaływanie dynamiczne strugi jest większe od ciśnienia statycznego, które panuje w rurociągu. Na powierzchni bocznej i tylnej czujnika ciśnienie jest niższe od ciśnienia statycznego w rurociągu. Ciśnienia z otworów piezometrycznych zlokalizowanych w części czołowej oraz bocznej lub tylnej czujnika, uśrednione w komorach dają sygnał $\Delta p = p^+ - p^-$ proporcjonalny do gęstości płynu oraz kwadratu jego prędkości. Na rys. 1 przedstawiono przykład przepływomierza z rurką uśredniającą ciśnienie dynamiczne. Na rys. 2 przedstawiono obszary wysokiego oraz niskiego ciśnienia tworzące się podczas opływu rurki (sondy) uśredniającej ciśnienie dynamiczne.



Rys. 1 Odbiór ciśnień w przepływomierzu z rurką uśredniającą ciśnienie dynamiczne

1 - sonda, 2- blok zaworów, 3- przetwornik różnicy ciśnień, 4- otwory impulsowe



Rys. 2 Obszary wysokiego oraz niskiego ciśnienia tworzące się podczas opływu przepływomierza z rurką uśredniającą ciśnienie dynamiczne

1-obszar niskiego ciśnienia, 2- obszar wysokiego ciśnienia

Wykorzystywane w praktyce przemysłowej kształty czujników i sposób rozmieszczenia otworów impulsowych w większości przypadków zapewniają w miarę stałą wartość współczynnika przepływu K w stosunkowo szerokim zakresie zmienności liczby Reynoldsa charakteryzującej przepływ. Wartość współczynnika K najczęściej zawiera się w zakresie $0,6 \div 0,8$. Średnią prędkość płynu podczas wykonywania pomiaru przepływomierzem z rurką uśredniającą ciśnienie dynamiczne wyznacza się z zależności:

$$w = K \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (1)$$

gdzie: K - współczynnik przepływu, Δp - ciśnienie różnicowe $p^+ - p^-$, gdzie p^+ - nadciśnienie, p^- - podciśnienie, ρ - gęstość płynu.

Stąd strumień objętości wyraża się wzorem:

$$q_v = K A_r \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (2)$$

gdzie: A_r - pole przekroju rurociągu.

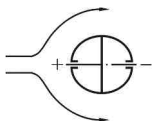
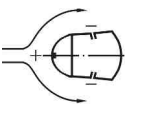
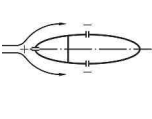
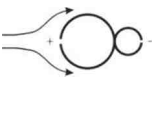
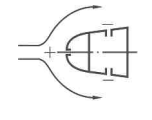
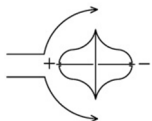
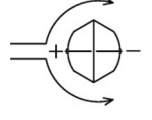
Stosowane w praktyce przemysłowej przepływomierze z czujnikami uśredniającymi ciśnienie dynamiczne, są zróżnicowane pod względem konstrukcyjnym. Różnice wynikają głównie z odmiennych kształtów przekroju poprzecznego sondy, budowy, jak również ilości i rozmieszczenia otworków impulsowych zarówno po stronie napływowej jak i odpływowej (bocznej).

W tabeli 1 zestawiono przekroje poprzeczne spotykanych w praktyce metrologicznej czujników uśredniających wraz z oznaczeniami punktów odbioru ciśnień p_+ i p_- . Tabela zawiera również podstawowe dane charakteryzujące rodzaj przepływomierza takie jak: zakres średnic rurociągów objętych pomiarami, zakres temperatur czynnika oraz współczynnik przepływu podane przez producenta. Zgromadzone w tabeli 1 wartości współczynnika przepływu K są wartościami przeciętnymi, których wielkość w głównej mierze jest zależna od kształtu danego czujnika. W zestawieniu nie uwzględniono przypadków instalowania czujników w rurociągach o małych średnicach. W przypadku zainstalowania przepływomierza w rurociągu o małej średnicy niska wartość współczynnika K np. 0,4 jest wynikiem spiętrzenia przepływu przez czujnik, podobnie jak przez zwężkę. Niejednokrotnie, w opisie własności metrologicznych omawianych czujników stosuje się współczynnik wzmocnienia Z wyrażony wzorem [38]:

$$Z = \frac{\Delta p}{\rho \frac{w^2}{2}} . \quad (3)$$

W szeregu pozycjach literaturowych podano przykłady budowy i stosowania analizowanych przepływomierzy w pomiarach strumieni różnych czynników w zróżnicowanych warunkach zastosowań [9, 24, 33, 36, 38, 44, 66, 73, 80]. Zestawienie porównawcze właściwości metrologicznych przepływomierzy z rurkami uśredniającymi ciśnienie dynamiczne przedstawiono m.in. w pracach [80, 81]. Wspomniana powyżej analiza wykazała wiele zalet rurek, a także wykazała pewne ich wady w zestawieniu z przepływomierzami całoprzewodowymi takimi jak kryzy czy zwężki. Poniżej zestawiono właściwości omawianych przepływomierzy dodając również, podane przez producentów, wymagane prostoosiowe odcinki przed i za przepływomierzem.

Tab. 1 Wybrane przekroje poprzeczne czujników uśredniających ciśnienie dynamiczne [1, 2, 5, 13, 29, 30, 31, 32, 60, 68, 70, 79]

Nazwa własna czujnika	Przekrój czujnika	K	Z	Zakres średnic objętych pomiarami, m	Zakres temperatur czynnika, °C
Accubar		0,6÷0,7	2÷2,8	0,013÷1,83	≤420
Verabar-Veris		~0,7	~2	0,013÷1,83	≤420
Preso		0,7÷0,8	1,6÷2	0,05÷1,82	≤426
Twin-Bar		~0,8	~1,6	0,08÷2,00	≤600
Introbar		0,7÷0,8	2,0÷2,4	0,013÷1,83	≤420
Deltaflow		~0,8	~2	0,02÷2,50	≤1200
Torbar		0,6÷0,8	2,0÷2,8	0,05÷1,80	≤450

2.2 Konstrukcje przepływomierzy

Pomiary strumieni i prędkości płynów zajmują ważne miejsce w eksploatacji pojedynczych urządzeń, jak i całych systemów już od starożytności. Pomimo, że pomiary te realizowane były już od wieków, niewiele można znaleźć materiałów z dawnych czasów na ten temat. Laik w chwili obecnej nie wiele się zastanawia nad pomiarami strumieni, jednak na co dzień spotyka się z pomiarem ilości mediów, takich jak: woda użytkowa, gaz ziemny czy benzyna. Wzmianki o pierwszych pomiarach hydrologicznych pochodzą z Egiptu. Ponieważ kraj Faraonów był uzależniony od wylewów wody Nilu (w ciągu 100 dni przez Nil płynie 90% rocznego przepływu) pomiary te były dla nich główną informacją, czy dany rok będzie urodzajny czy suchy. Pomiary te datuje się na okres 3000 lat p.n.e, kiedy to używano wodowskazów do określania stanu wody w Nilu [47]. Badania archeologiczne oraz zachowane budowle pozwoliły wykazać, że w Egipcie stosowano wzdłuż Nilu trzy typy wodowskazów, na którychznaczono stany rzeki w poszczególnych latach:

- budowle w pobliżu rzeki,
- schody wiodące do rzeki,
- specjalnie wybudowane obiekty w kształcie prostokątnej, lub cylindrycznej studni, połączonej z rzeką dwoma lub trzema kanałami.

Stan wody odczytywano na centralnie umieszczonej kolumnie, bądź na schodach wewnątrz zbiornika. Równie wysoki stopień zrozumienia zasad hydrauliki w czasach starożytnych co Egipcjanie reprezentowali Rzymianie oraz Chińczycy. Chińczycy w czasach starożytnych zaprojektowali i wybudowali zbiorniki i systemy kanałów, które minimalizowały skutki powodzi. W sposób niezmieniony wykorzystywane są do chwili obecnej [73].

Rzymianie wybudowali liczne akwedukty, które były odpowiednikami dzisiejszych wodociągów doprowadzających wodę ze źródeł położonych w górach do miast rzymskich. Woda była dostarczana do licznych fontann, łaźni i szaletów publicznych, oraz do bogatszych domów. W II wieku n.e. Rzym, który liczył około miliona mieszkańców, był zaopatrywany przez 11 akweduktów liczących łącznie 420 km, z czego tylko 47 km przebiegało nad powierzchnią ziemi. Sieć ta dostarczała milion metrów sześciennych wody źródlanej na dobę [47]. Bez wiedzy metrologicznej dotyczącej przepływów nie było by możliwe zbudowanie tak zaawansowanych budowli hydrologicznych.

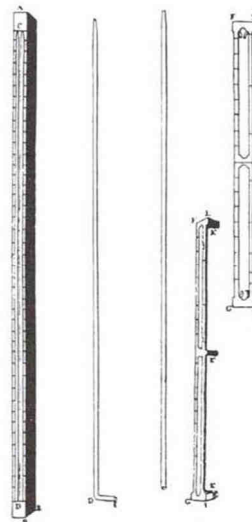
W celu wyznaczenia prędkości przepływu konieczne, jest wprowadzenie kolejnej wielkości, jaką jest czas. W starożytności człowiek mierzył upływ czasu w zakresie liczby dni czy faz księżyca. Do pomiaru prędkości przepływu taka jednostka odniesienia była zbyt niedokładna. Pomiar czasu stał się bardziej precyzyjny wraz z wynalezieniem zegara słonecznego, jednak nie był on możliwy w czasie niepogody czy w nocy. Około 1400 p.n.e., Egipcjanie wynaleźli zegar wodny. Zegar wodny stanowił postęp w porównaniu z zegarem słonecznym, ponieważ nie był uzależniony od pory doby ani od pogody. Najdawniejszą postacią zegara wodnego był dzban z otworem w dnie. Wyplięnięcie z dzbana odmierzonej ilości wody oznaczało, że upłynął określony czas. Zegary działające na tej zasadzie (tzw. klepsydry) szeroko stosowano w starożytności. W Grecji używano ich do ograniczania czasu przemówień podczas procesów. Jednak w prostej postaci zegar wodny był niedoskonały a zakres jego stosowania był ograniczony [73].

Sformułowanie pojęcia przepływu pojawiło się dopiero w okresie hellenistycznym około I w.p.n.e w dziele Dioptra - Herona z Aleksandrii [47, 73]. W dziele tym zapisana została formuła, pozwalająca określić przepływ jako iloczyn pola przekroju i prędkości wody $q_v = w \cdot A$, będąca podstawowym wzorem pozwalającym wyznaczyć przepływ. W dziele tym zawarte są również informacje na temat sposobu pomiaru wydajności źródeł za pomocą naczyń cechowanych i pomiaru czasu ich napełniania (metoda wolumetryczna). Idee Herona nie znalazły zastosowania w jego czasach, ponieważ sądzono wtedy błędnie, że przepływ zależy tylko i wyłącznie od przekroju poprzecznego cieku. Sextus Juliusz Frontinus (35 -104 r. n.e.), kurator do spraw wodnych Rzymu, opisuje systemy doprowadzające wodę do Rzymu, przyjmując, że przepływ wynika jedynie z przekrojów przewodów (akweduktów) doprowadzających wodę. Rozbieżności między obliczeniami a rzeczywistym przepływem, Frontinus tłumaczył bądź nieszczelnościami, bądź kradzieżami wody przez Rzymian [47]. Podsumowując, wkład starożytnych cywilizacji do określenia zasad pomiaru przepływu jest znaczący, wynaleziono zegar słoneczny a później wodny, pompę śrubową, mierzono poziom wody w rzekach czy ilość opadów, powstawały pierwsze kalendarze hydrologiczne. Równie ważnym elementem dla rozwoju pomiarów przepływów było matematyczne uściślenie pojęcia *przepływ* [47, 73, 77].

Era nowoczesnej mechaniki płynów rozpoczęła się za życia takich wielkich postaci jak Galileusz, Leonardo da Vinci czy Newton. W XVI w. n. e. Leonardo da Vinci wniósł nowe idee do pomiarów przepływu. Zauważył, że przepływ wody podlega zasadzie ciągłości oraz poznał istotę wpływu pochylenia koryta na przepływ. Przeprowadził również badania

prędkości wody za pomocą pływaków, gdzie drogę przez nie przebytą mierzył chodometrem, a czas przebycia drogi poprzez nucenie gamy. Leonardo da Vinci zgadzał się z tezą Herona, że przepływ jest zależny od przekroju koryta i prędkości wody. Mimo to w jego czasach dalej stosowano błędną formułę Frontiusa ($q_v = A$). Przełom nastąpił po publikacji książki Benedetteo Castelli (1577 - 1644), wydanej w 1628 roku. Ten uczeń Galileusza wykazał w swoim dziele ostatecznie, że poglądy Herona i Leonarda da Vinci były słuszne [47].

Metody pomiaru strumieni płynu ze względu na różne właściwości fizyczne mierzonych mediów oraz techniki wykorzystywane w trakcie pomiarów posiadają dość obszerną historię. Poniżej przedstawiono kilka przykładów przepływomierzy piętrzących przepływ w ujęciu historycznym. Henri de Pitot (1695 - 1771), wynalazł rurkę przedstawioną na rys. 3 i nazwaną od jego nazwiska. Zbudowana była z dwóch równoległych rur, z których jedna jest wygięta na końcu. Różnica ciśnień otrzymana podczas wykonania pomiaru mogła następnie być przedstawiona w funkcji prędkości strumienia.

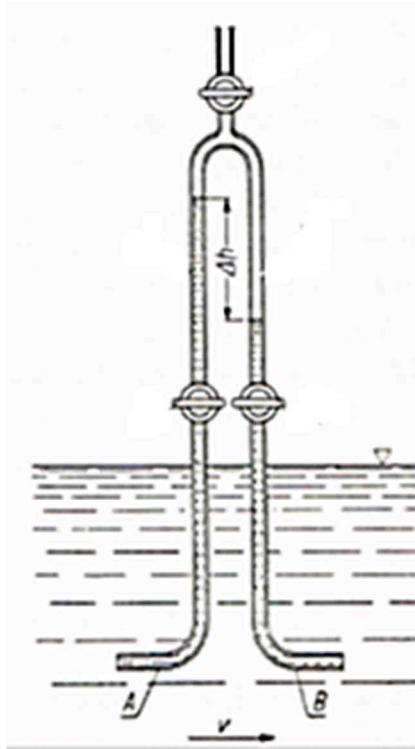


Rys. 3 Budowa oryginalnej rurki Pitota [73]

Pitot w późniejszych pracach pisał, że pomysł był tak prosty i naturalny, iż nie wie jak wynalazek ten mógł umknąć tak wielu utalentowanym ludziom, którzy pracowali nad ruchem wody przed nim. Rurka Pitota stała się jednym z pierwszych i najbardziej niezawodnych przyrządów pomiarowych okresu w którym żył. Rurka Pitota do chwili obecnej jest nadal bardzo popularnym przyrządem do pomiaru prędkości, zwłaszcza w lotnictwie i przemyśle morskim, gdzie jest to główny instrument wskazujący prędkość.

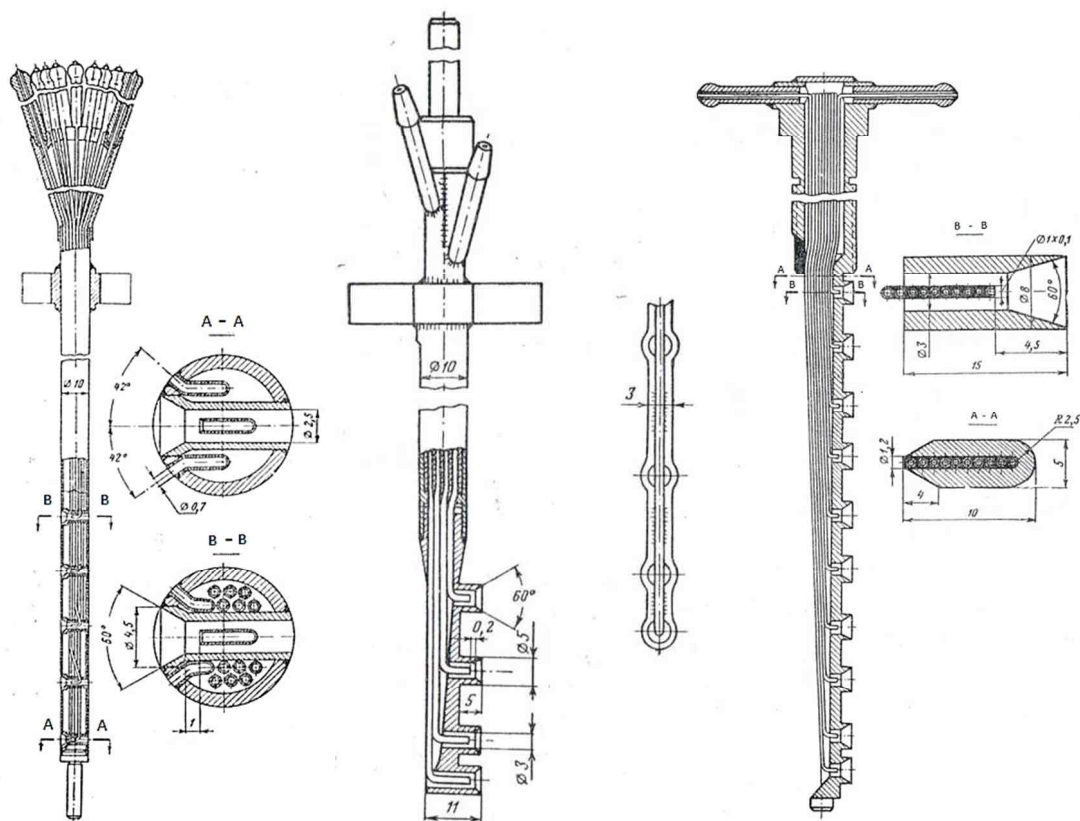
W roku 1858 H. Darcy wraz z L. Prandtlem stworzyli nowy typ przepływomierza różnicowego przedstawiony na rys. 4., który to jest modyfikacją wynalazku H. Pitota

opisanego wcześniej. Poprzez zastosowanie dwóch rurek możliwy jest pomiar ciśnienia spiętrzenia (rurka A), oraz ciśnienia statycznego (rurka B). Dzięki znajomości różnicy ciśnień Δp oraz po uwzględnieniu parametrów fizycznych płynu, możliwe jest wyznaczenie prędkości przepływającego płynu.



Rys. 4 Budowa rurki Darcy-ego [77]

W drugiej połowie XX wieku, w byłym Związku Radzieckim opracowano szereg rozwiązań konstrukcyjnych przepływomierzy do pomiaru ciśnienia całkowitego w przewodzie. Rys. 5 przedstawia wybrane konstrukcje analizowanych przepływomierzy [98, 99]. Konstrukcja przepływomierzy opiera się na punktowym pomiarze ciśnienia spiętrzenia w kilku miejscach przewodu. Otwory impulsowe rozłożone są na całej długości sondy. W przepływomierzach tych często nie występuje komora uśredniająca. Rozwiązanie takie stwarza problemy zarówno podczas wytwarzania elementu spiętrzającego, jak i podczas eksploatacji. Wiąże się to również z koniecznością wyposażenia układu pomiarowego w większą ilość przetworników różnicy ciśnień.



Rys. 5 Wybrane konstrukcje sond do pomiaru ciśnienia całkowitego [98, 99]

Postęp w badaniach w obszarze mechaniki płynów wniósł rozwój elektroniki a później techniki mikroprocesorowej. Pozwoliło to na badanie wielu procesów i zjawisk związanych z płynami m.in. turbulencji w przepływach. Taki rozwój elektroniki pozwolił również na stworzenie nowych rodzajów przepływomierzy oraz zmniejszenie niepewności pomiaru przepływomierzy już istniejących.

2.3 Zagadnienia związane z budową sond

Przepływomierze piętrzące przepływ, a do takich należą przepływomierze z sondami uśredniającymi ciśnienie dynamiczne, były już od dawna przedmiotem licznych badań. Dotyczyły one głównie przepływomierzy zwężkowych, które stanowiły i stanowią najliczniejszą grupę przepływomierzy w zastosowaniach przemysłowych. Badania te pozwoliły wyodrębnić grupę zwęzek o stałych współczynnikach (wówczas liczbie przepływu) w szerokim zakresie zmienności strumienia i powtarzalności wskazań, a następnie je znormalizować [62, 63]. Nieodłącznym elementem przepływomierza piętrzącego jest przetwornik pomiarowej różnicy ciśnień. W przypadku przepływomierzy piętrzących wymaga się od tego urządzenia szerokiego zakresu wskazań oraz niskiej niepewności pomiaru. Jest to szczególnie ważne w przypadku sond uśredniających ciśnienie dynamiczne,

które niejednokrotnie pracują przy niskich wartościach Δp . Ostatnie 20 lat to wielki postęp w rozwoju tych urządzeń i gdy urządzenia te miały w latach 70-tych sumaryczną niepewność pomiaru w granicach $1\% \div 1,5\%$ wartości wielkości mierzonej, to obecnie sumaryczna niepewność pomiaru w warunkach kalibracji przyrządu nie przekracza $0,1\%$ wartości wielkości mierzonej. Zastosowanie techniki mikroprocesorowej i wielu nowości materiałowej zaowocowało taką poprawą niepewności wskazań. To z kolei spowodowało, że sondy uśredniające ciśnienie dynamiczne jako czujniki zaczęły być coraz częściej stosowane.

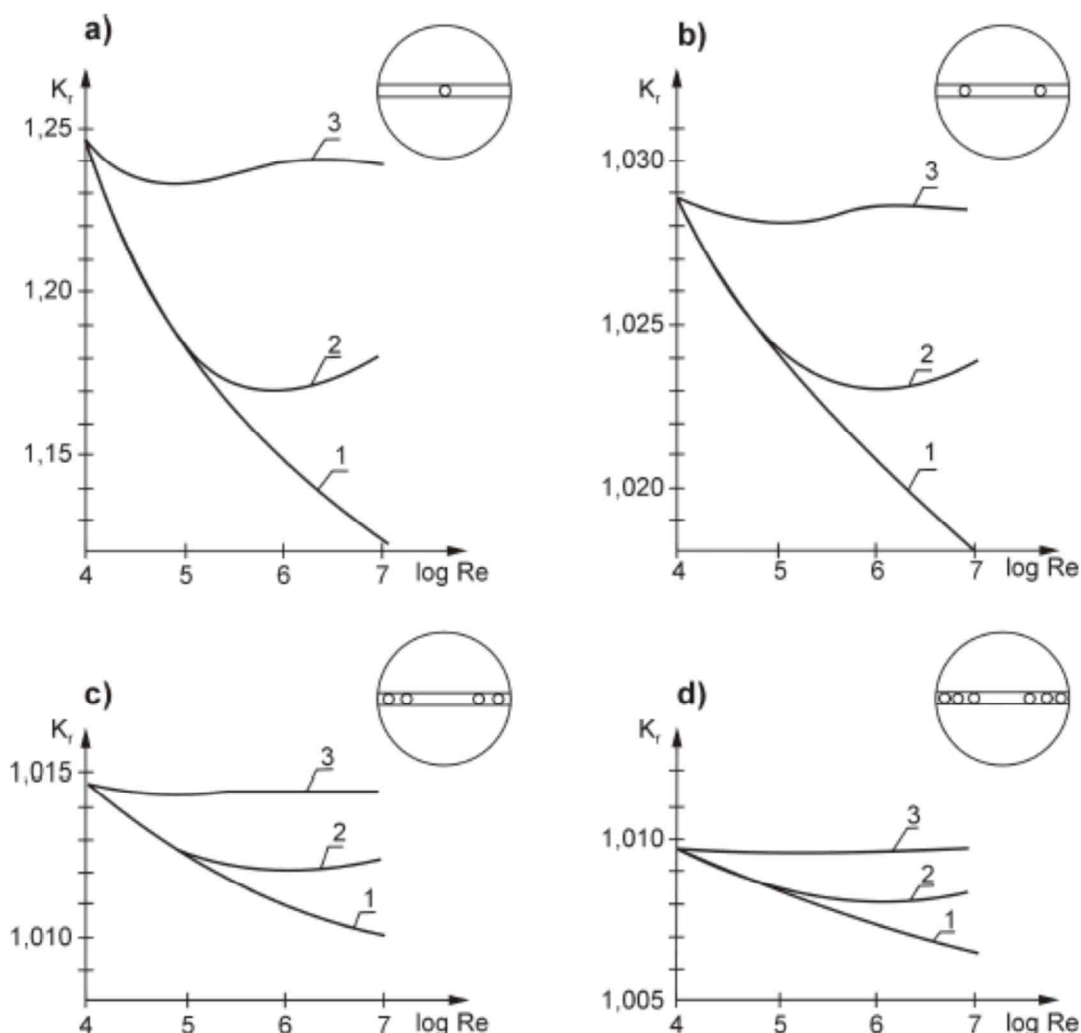
Badania sond uśredniających ciśnienie dynamiczne nie mają tak licznej bibliografii naukowej jak zwężki. Nie mniej jednak, różne zagadnienia związane z budową i eksploatacją tych przepływomierzy były przedmiotem prac badawczych.

Jedną z podstawowych cech sondy jest kształt jej przekroju oraz miejsce odbioru różnicy ciśnień, co rzutuje w bezpośredni sposób na wartość współczynnika przepływu sondy. Najliczniejszą bibliografię posiadają sondy o przekroju kołowym. Opływ takiej sondy, jako opływ walca był od dawna przedmiotem badań w obszarze hydro i aerodynamiki [6, 7, 12, 15, 34, 74, 96]. Wyznaczony rozkład ciśnień na pobocznicę walca i zmienność tego rozkładu w funkcji liczby Reynoldsa stanowiła przyczynek do określenia zakresu pomiarowego sondy. W dokumentacji przepływomierzy o różnych kształtach przekroju: rombówym [29] eliptycznym [13], opływowym [79, 30] czy czujnika dwuprofilowego [65] zawarte są informacje m.in. o wartościach współczynników przepływu sond i zakresie ich stosowalności. W [65] znaleźć można wyniki badań dotyczących optymalizacji położenia otworu impulsowego p^* w przypadku sondy dwuprofilowej. W szeregu pracach [14, 15, 40] zwrócono uwagę na okresowe zaburzenia, wiry, jakie generuje wiele opływowych kształtów i związaną z tym zmiennością i niestabilnością współczynnika przepływu sondy. Wiry te są również źródłem generacji drgań czujników. W pracy [36] wyznaczono na podstawie obliczeń numerycznych ścieżkę wirową Karmana i związane dynamiczne oddziaływanie strugi z drganiami sondy. Drgania sond są jednym z istotnych problemów eksploatacyjnych. Producenci określają zastrzeżone, ze względu na drgania zakresy prędkości płynu i sposoby mocowania czujników. Dokumentacje nie zawierają jednak więcej szczegółów dotyczących przyjętej metodyki obliczeń bądź wykonanych badań eksperymentalnych. Cechą konstrukcyjną sond jest liczba i sposób rozmieszczenia otworów impulsowych oraz wykonanie komór uśredniających. Rozmieszczając otwory impulsowe w sondzie najczęściej opiera się na metodzie polegającej na podziale pola przekroju rurociągu na pierścienie

o jednakowych średnicach i wyznaczeniu prędkości w połowie pierścienia. Ta metoda określa promień i-tego otworu

$$r_i = R_w \sqrt{\frac{2i-1}{n}}, \quad (4)$$

gdzie: i- numer kolejnego otworu począwszy od osi rurociągu, R_w - promieniem rurociągu, $n/2$ - jest liczbą otworów impulsowych znajdujących się na promieniu R rurociągu. Na rys. 6 zaczerpniętym z [38], przedstawiono wyniki badań, które można również interpretować jako wpływ liczby otworów impulsowych na dodatkową niepewność pomiaru związaną ze sposobem wyznaczenia prędkości średniej.



Rys. 6 Stosunek prędkości mierzonej za pomocą rurki spiętrzającej do prędkości średniej w rurociągu dla różnej liczby otworów: a) 1 otwór, b) 2 otwory, c) 4 otwory, d) 6 otworów [34] Chropowatości rurociągu wynoszą odpowiednio: 1- $R/k=\infty$ (rurociąg hydraulicznie gładki), 2- $R/k= 1000$, 3- $R/k= 100$ [38].

Ze względu na fakt, że prędkość płynu w środku pierścienia nie jest reprezentatywną dla pola pierścienia, w pracy [87] podano zależność korygującą położenie otworu impulsowego w pierścieniu.

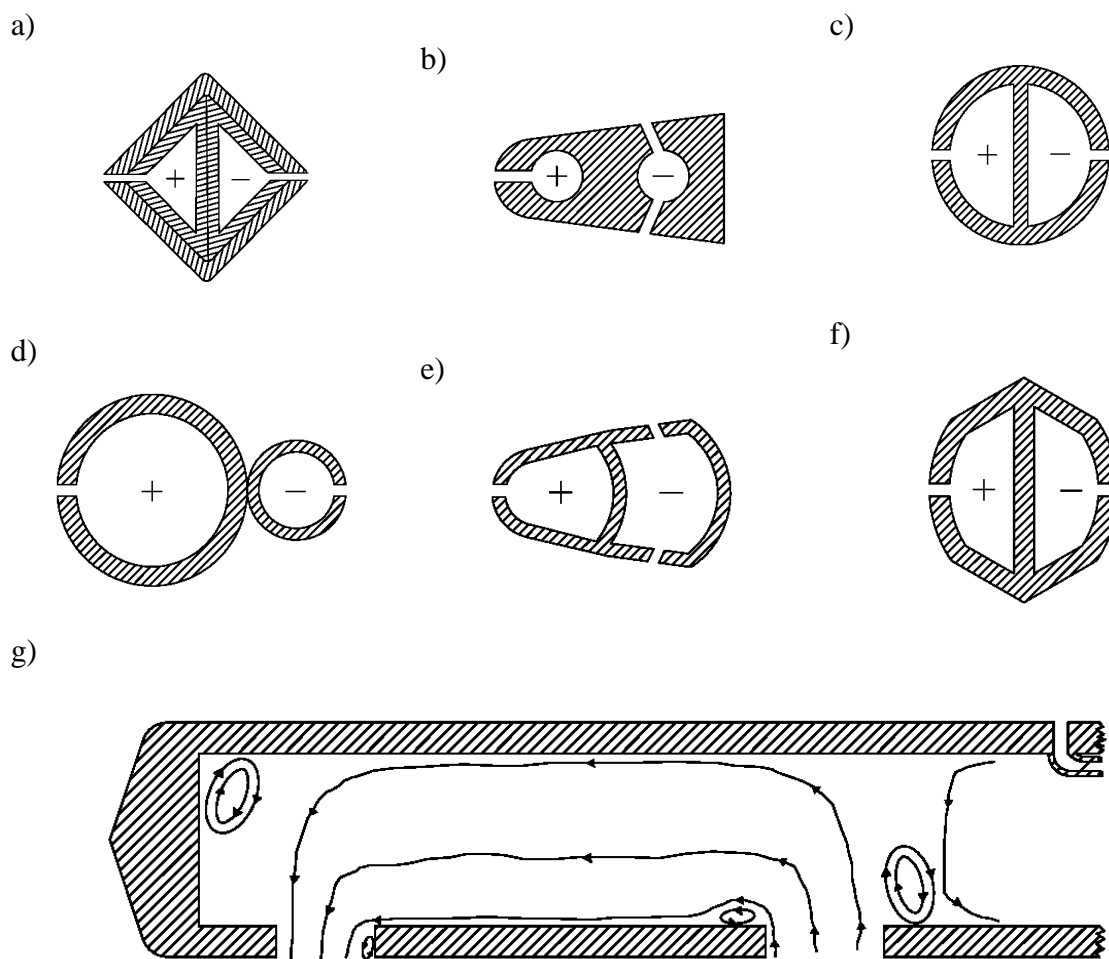
$$r_i = \left(\frac{2(r_{i_2}^{m+2} - r_{i_1}^{m+2})}{(m+2)(r_{i_2}^2 - r_{i_1}^2)} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (5)$$

gdzie r_{i_2} i r_{i_1} są odpowiednio zewnętrznym i wewnętrznym promieniem pierścienia a m wykładnikiem zależnym od liczby Re występującym we wzorze potęgowym Prandtla [77]. Taki sposób określenia położenia otworów impulsowych pozwala na zmniejszenie niepewności pomiaru strumienia ze względu na sposób rozmieszczenia otworów poniżej 1% [75, 81]. Proponowano różne wzory opisujące profil prędkości płynu w rurociągu [21, 84, 86, 89]. Oparcie na nich metodyki otworowania rurociągu i wyznaczenie prędkości średniej wiąże się z niepewnością pomiaru związaną z rozmieszczeniem otworów impulsowych w liczbie 6 i więcej nie większą niż 1%.

Również średnica otworów impulsowych może mieć wpływ na niepewność pomiaru. Ich średnica powinna być na tyle mała, aby pomiar można było traktować jako punktowy [87, 88]. Jednak zbyt małe otwory impulsowe częściej są zatykane przez zanieczyszczenia. Wyniki badań eksperymentalnych nad wpływem wielkości otworów impulsowych na niepewność pomiaru strumienia sondą przedstawił Król w pracy [44]. Badano wpływ wielkości średnicy otworów zwiększając ją co 0,5mm od 1 do 3mm. Działania takie powodują zmianę współczynnika przepływu w granicach 1%. W opracowaniu [3] powołano się na wzór uzależniając średnicę otworu impulsowego - d_o od prędkości minimalnej płynu - U_{min} i jego współczynnika lepkości kinematycznej - ν .

$$d_o = 60 \frac{\nu}{U_{min}} . \quad (6)$$

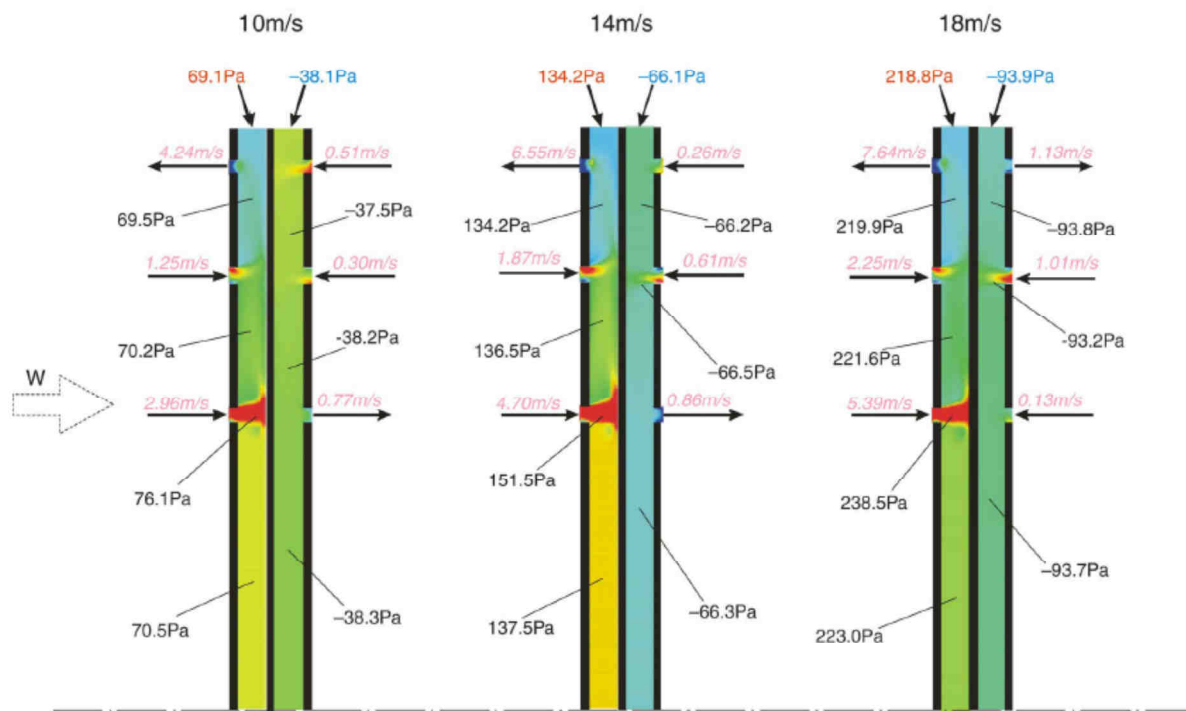
Jednak podkreśla się, że zasadniczym kryterium przy doborze średnicy otworów impulsowych jest ich drożność w warunkach eksploatacyjnych. Produkowane przepływomierze posiadają wymiary przekroju poprzecznego sondy w granicach od 12 do 70 mm [1, 2, 13, 32]. Różne kształty przekroju sond usredniających ciśnienie dynamiczne oraz różne technologie wykonania sond są przyczyną, że komory usredniające ciśnienie posiadają różną konstrukcję i objętość dla tej samej średnicy rurociągu. Na rys. 7 przedstawiono przekroje komór usredniających różnych sond.



Rys. 7 Przekroje komór uśredniających sond pięttrzających: a) Honeywell [29], b) Introbar [30], c) Accubar [2], d) Twin- Bar [70], e) Veris- Verabar [79], f) Torbar [76] g) cyrkulacja czynnika wewnątrz komory uśredniającej (p^+) rurki spiętrzającej [28].

Istotnym zagadnieniem technologicznym jest stworzenie wewnątrz sondy dwóch komór odseparowanych od siebie, uśredniających ciśnienia całkowite po stronie napływu i odpływu strumienia. Realizuje się to poprzez wprowadzanie wewnątrz kształtki przegrody rys. 7c) i 7e), wprowadzanie do wnętrza kształtki dodatkowych profili zamkniętych zgrzewanych z kształtką zewnętrzną rys. 7a), wywiercenie komór w litym materiale 7b), czy połączenie dwóch kształtów rys. 7d). Spotyka się również rozwiązania gdzie uśrednia się sygnał z otworów impulsowych po stronie napływowej, a po stronie odpływowej odbierane jest przewodem impulsowym ciśnienie z jednego z otworów; rys. 7f). W przypadku sond o przekroju okrągłym stosowano rozwiązania, w których ciśnienie statyczne odbierano ze ścianki rurociągu, a w komorze uśredniano ciśnienie całkowite od strony napływu [24, 25, 26, 44, 81, 82]. Rozwiązanie takie upraszcza budowę przepływomierza, ale zmniejsza uzyskiwaną pomiarową różnicę ciśnień.

Interesującym zagadnieniem jest rozkład ciśnień i ruch płynu wewnątrz komór przepływomierza. Z prac Hickmana [28], Walusia [33, 83] i Gondka [24, 26] wynika, że płyn wpływa otworem położonym najbliżej osi rurociągu, a wypływa otworem przy ścianie rurociągu. Zakłada się symetrię zjawisk hydromechanicznych na zewnątrz i wewnątrz sondy wynikającą z symetrii otworowania i z jednakowych oporów hydraulicznych otworów piezometrycznych oraz dróg wewnątrz komór, jeśli przepływ płynu w rurociągu jest w pełni rozwinięty. W pracy [11] podjęto próbę wyznaczenia ruchu płynu na zewnątrz i wewnątrz sondy opływowej i okrągłej rozwiązując numerycznie w tym obszarze równania ruchu płynu z dołączonymi równaniami modelu turbulencji $k-\varepsilon$. Przykładowe wyniki dotyczące rozkładów prędkości i ciśnień wewnątrz sondy o przekroju kołowym zaczerpnięte z [11] przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8 Rozkłady prędkości i ciśnień wewnątrz sondy o przekroju kołowym [11]

Zamieszczone na rys. 8 wyniki wskazują, że zgodnie z wcześniej cytowanymi pracami ruchu płynu w komorze p^+ jest od otworu najbliżej osi symetrii w kierunku ścianki rurociągu. W komorze niskiego ciśnienia ruch ten jest bardziej złożony i zależy on również od wartości średniej prędkości napływającej strugi.

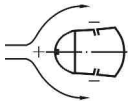
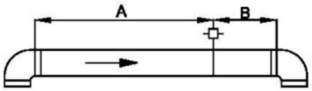
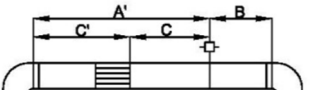
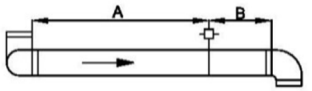
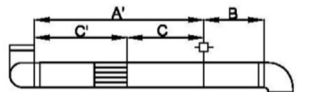
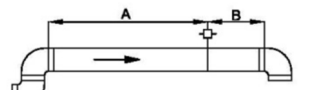
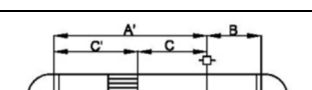
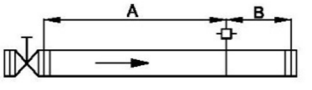
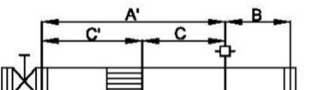
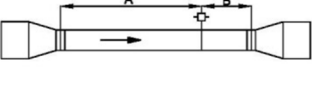
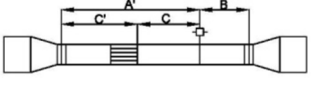
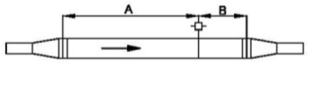
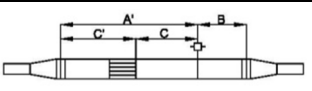
2.4 Zagadnienia związane z instalacją i eksploatacją sond

Jednym z bardzo istotnych czynników, mających wpływ na uzyskiwaną później niepewność pomiaru strumienia, jest właściwe zainstalowanie przepływomierza w układzie przepływowym. Szczególnie ważne jest zapewnienie odpowiednio długich prostych odcinków przed i za miejscem umieszczenia sondy. Pozwala to w jak największym stopniu zapewnić osiową symetryczność rozkładu prędkości w przekroju rurociągu, która odpowiada warunkom wzorcowania przepływomierza [3, 64]. Wymagania dotyczące minimalnych odcinków prostych przed i za przekrojem pomiarowym w przypadku sond uśredniających ciśnienie dynamiczne dla różnego rodzaju elementów instalacyjnych (kolana zasowy, konfuzory, dyfuzory itp.) przedstawili w swoich pracach Gondek [23], Kabza [39] oraz Miller [57]. Część z tych informacji zebrano w [43]. Tego typu informacje znaleźć można również w dokumentacjach technicznych przepływomierzy z sondami uśredniającymi ciśnienie dynamiczne [1, 2, 5, 13, 29, 30, 31, 32, 60, 68, 70, 79]. Zestawienie wybranych czujników uśredniających ciśnienie dynamiczne oraz odległości jakie należy zachować w przypadku ich lokalizacji przed (A) i za (B) w odniesieniu do typowych elementów instalacji przemysłowych przedstawiono w tabeli 2. W tabeli 2 zamieszczono również dane dotyczące odległości od elementu zaburzającego do prostownicy strumienia (C') oraz od prostownicy do sondy uśredniającej ciśnienie dynamiczne (C). Zestawione w tabeli 2 informacje pochodzą z danych literaturowych, materiałów udostępnionych przez producentów oraz dystrybutorów poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych sond piętujących ciśnienie dynamiczne.

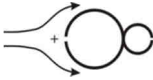
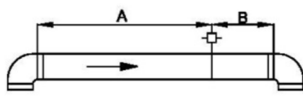
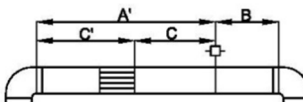
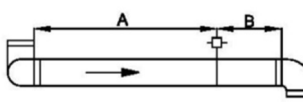
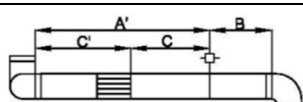
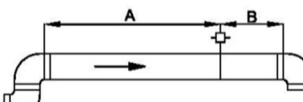
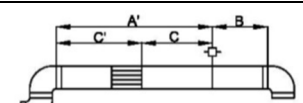
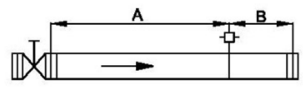

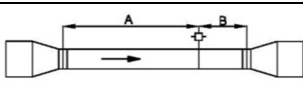
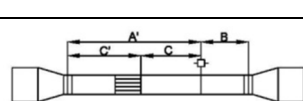
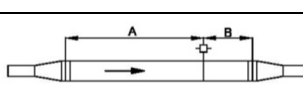
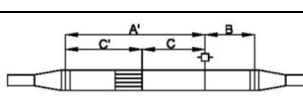
W przypadku niedotrzymania wymaganych prostych odcinków rurociągu, proponuje się różnego rodzaju prostownice strumienia [46, 58, 59, 72]. Łatwe do realizacji jest to w przypadku w miarę czystych płynów, gdy średnice rurociągu zawierają się w granicach 100 ÷ 300mm. W przypadku większych średnic rurociągów, prostownice strumienia nie są stosowane ze względu na koszt ich wykonania, a przede wszystkim ze względu na opory przepływu, do których wprost proporcjonalne są straty energii. Z tego też powodu bardzo istotne jest określenie, jak zbyt krótkie odcinki, przede wszystkim przed sondą, wpływają na zwiększenie niepewności pomiaru.

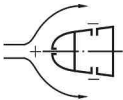
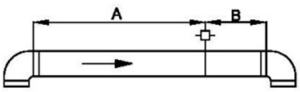
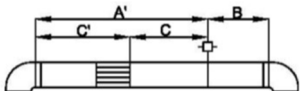
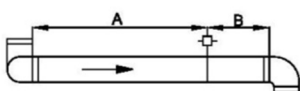
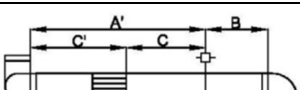
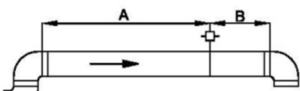
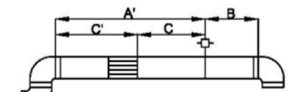
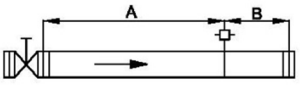
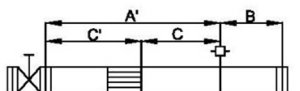

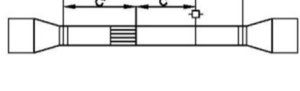
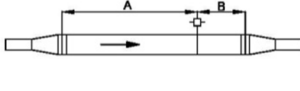
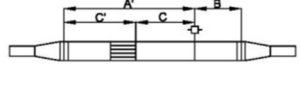
Tab. 2 Wybrane typy czujników uśredniających ciśnienie dynamiczne oraz odległości przed i za typowymi elementami zaburzającymi przepływ [1, 2, 5, 13, 29, 30, 31, 32, 60, 68, 70, 79].

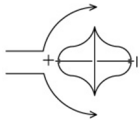
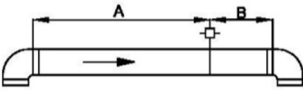
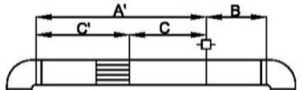
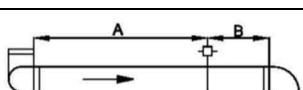
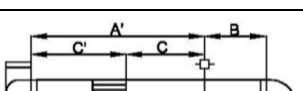
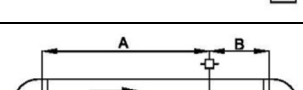
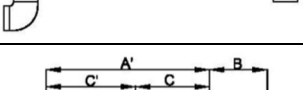

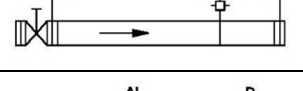

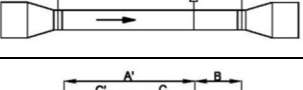
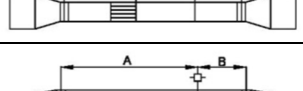
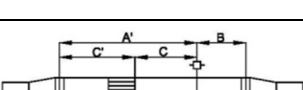
Nazwa własna czujnika	Przekrój czujnika	Konfiguracja rurociągu	Wymagane odcinki proste				
			A	B	A'	C	C'
Accubar			8-10D	4-6D	-	-	-
			-	4-6D	6-8D	-	-
			24-28D	4-6D	-	-	-
			-	4-6D	10-12D	-	-
			12-15D	4-6D	-	-	-
			-	4-6D	8-10D	-	-
			24-28D	4-6D	-	-	-
			-	4-6D	10-12D	-	-
			8-10D	4-6D	-	-	-
			-	4-6D	8-10D	-	-
			8-10D	4-6D	-	-	-
			-	4-6D	8-10D	-	-

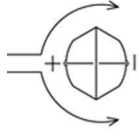
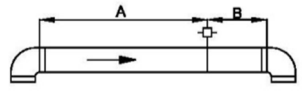
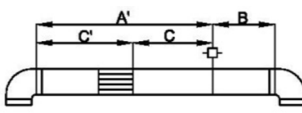
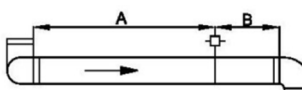
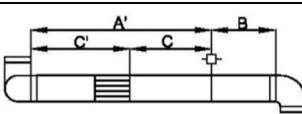
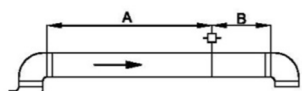
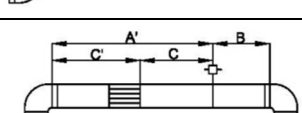
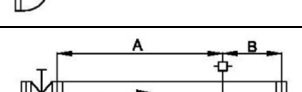
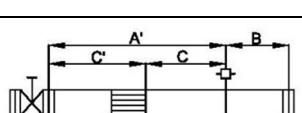
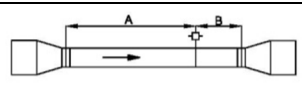
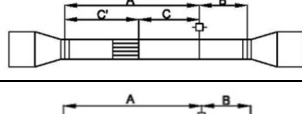


Nazwa własna czujnika	Przekrój czujnika	Konfiguracja rurociągu	Wymagane odcinki proste				
			A	B	A'	C	C'
Veris-Verabar			7D	3D	-	-	-
			-	3D	7D	-	-
			18D	3D	-	-	-
			-	3D	9D	-	-
			9D	3D	-	-	-
			-	3D	9D	-	-
			24D	4D	-	-	-
			-	4D	9D	-	-
			8D	3D	-	-	-
			-	3D	8D	-	-
			8D	3D	-	-	-
			-	3D	8D	-	-

Nazwa własna czujnika	Przekrój czujnika	Konfiguracja rurociągu	Wymagane odcinki proste				
			A	B	A'	C	C'
Preso			7D	3D	-	-	-
			-	3D	5D	3D	2D
			24D	4D	-	-	-
			-	4D	10D	5D	5D
			11D	3D	-	-	-
			-	3D	9D	4D	5D
			27D	4D	-	-	-
			-	4D	11D	6D	5D
			9D	4D	-	-	-
			-	4D	10D	4D	6D
			9D	4D	-	-	-
			-	4D	10D	4D	6D

Nazwa własna czujnika	Przekrój czujnika	Konfiguracja rurociągu	Wymagane odcinki proste				
			A	B	A'	C	C'
Twin-Bar			5D	3D	-	-	-
			-	-	-	-	-
			12D	4D	-	-	-
			-	-	-	-	-
			7D	3D	-	-	-
			-	-	-	-	-
			15D	4D	-	-	-
			-	-	-	-	-
			5D	3D	-	-	-
			-	-	-	-	-
			5D	3D	-	-	-
			-	-	-	-	-

Nazwa własna czujnika	Przekrój czujnika	Konfiguracja rurociągu	Wymagane odcinki proste				
			A	B	A'	C	C'
Introbar			8D	3D	-	-	-
			-	-	-	-	-
			22D	3D	-	-	-
			-	-	-	-	-
			12D	3D	-	-	-
			-	-	-	-	-
			24D	4D	-	-	-
			-	-	-	-	-
			8D	3D	-	-	-
			-	-	-	-	-
			8D	3D	-	-	-
			-	-	-	-	-

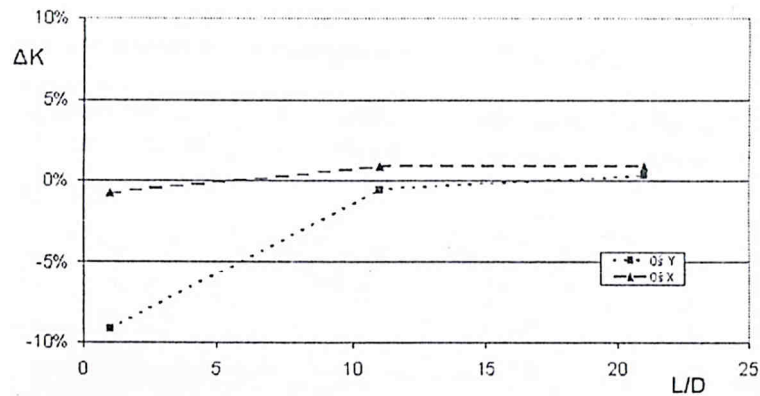
Nazwa własna czujnika	Przekrój czujnika	Konfiguracja rurociągu	Wymagane odcinki proste				
			A	B	A'	C	C'
Deltaflow			1-7D	2-4D	-	-	-
			-	-	-	-	-
			2-12D	2-4D	-	-	-
			-	-	-	-	-
			1-7D	2-3D	-	-	-
			-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-
			1-7D	1-3D	-	-	-
			-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-

Nazwa własna czujnika	Przekrój czujnika	Konfiguracja rurociągu	Wymagane odcinki proste				
			A	B	A'	C	C'
Torbar			7-9D	3D	-	-	-
			-	-	-	-	-
			19-24D	3D	-	-	-
			-	-	-	-	-
			9-14D	3D	-	-	-
			-	-	-	-	-
			24D	4D	-	-	-
			-	-	-	-	-
			8D	3D	-	-	-
			-	-	-	-	-
			8D	3D	-	-	-
			-	-	-	-	-

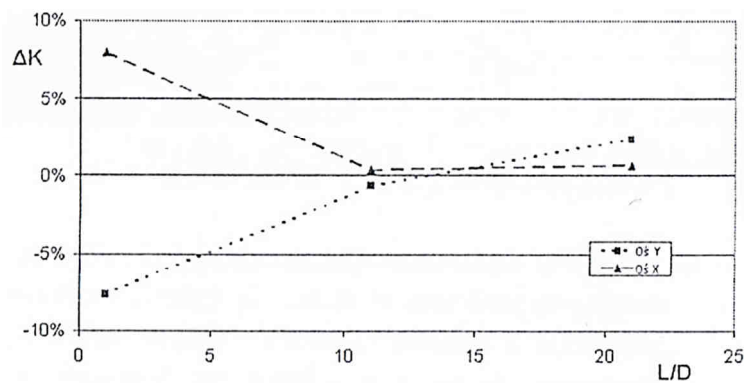
(-) brak danych

Istotny wkład wiedzy dotyczącej powyższego zagadnienia wnoszą prace [90, 91, 93, 94] będące pokłosiem pracy doktorskiej [92] obronionej w roku 2006 na Politechnice Śląskiej. Na rys. 9 zaczerpniętym z [91] przedstawiono zmiany współczynnika przepływu sondy o przekroju kołowym umieszczonej w odległości 1D, 11D i 21D odpowiednio za kolaniem, dwoma kolanami w jednej i w dwóch różnych płaszczyznach.

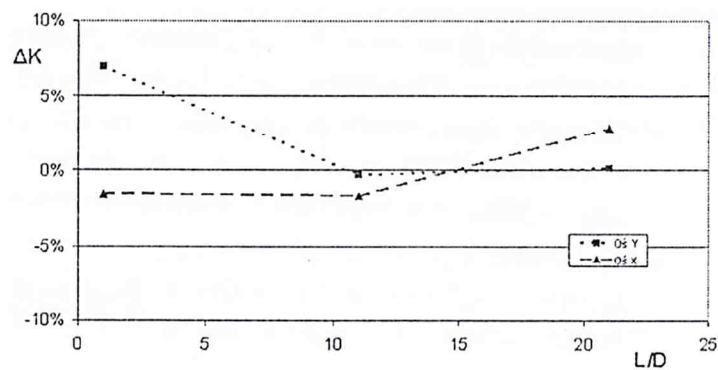
a)



b)



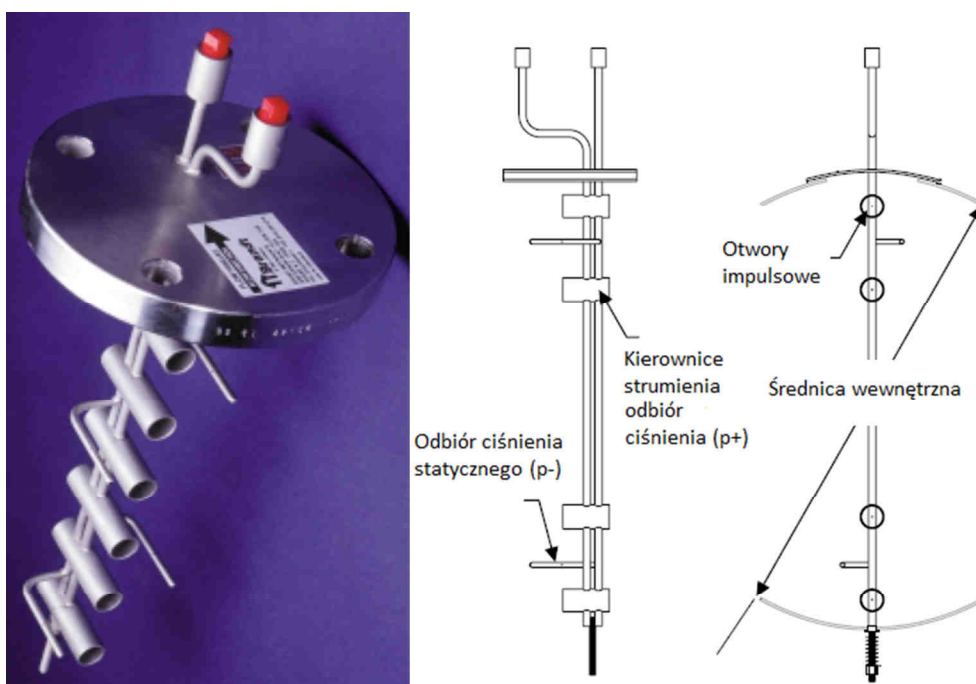
c)



Rys. 9 Zmiana współczynnika przepływu ΔK w funkcji odległości za: a) kolaniem, b) dwoma kolanami w jednej płaszczyźnie, c) dwoma kolanami w dwóch płaszczyznach dla $Re_D \approx 211000$ [91]

Sonda umieszczona była zarówno pionowo jak i poziomo. Jak stwierdza autor „największe zmiany współczynnika przepływu ΔK zaobserwowano w obszarze symetrycznej deformacji profili prędkości, występującej w pobliżu ścianek, czyli tam gdzie znajduje się więcej otworów impulsowych czołowej strony rurki uśredniającej”. Co było do przewidzenia, największa zmiana współczynnika przepływu występuje w płaszczyźnie blisko kolana ($1D$). W cytowanych pracach brak jest informacji dotyczących wpływu zaburzenia na wskazania przepływomierza umieszczonego w odległościach pośrednich między $1D$ i $11D$, które to informacje mają duże znaczenie praktyczne.

Istnieją również rozwiązania konstrukcyjne, które są „mniej wrażliwe” na zaburzenia profilu prędkości. Przykładem może być rozwiązanie zaproponowane przez firmę Peek Measurement [60], przedstawiono na rys. 10.



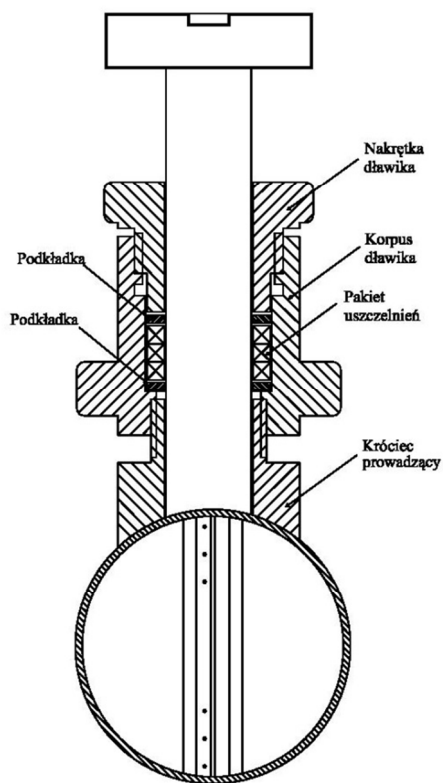
Rys. 10 Idea konstrukcji sondy firmy Peek Measurement [60]

W tej konstrukcji zastosowano elementy nakierowujące płyn na otwory impulsowe plusowe oraz odmienny sposób odbioru ciśnienia statycznego (p -).

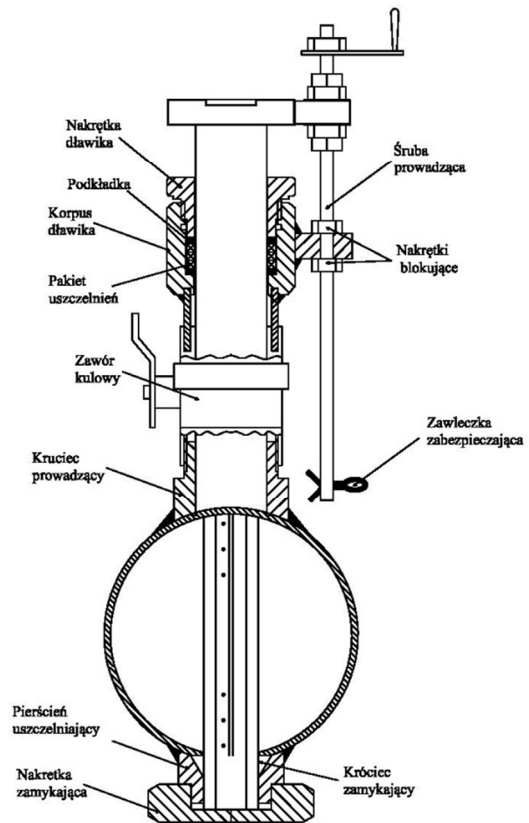
Kolejną nie mniej istotną zaletą przepływomierzy z rurkami uśredniającymi ciśnienie dynamiczne jest zmniejszenie, w zasadzie do minimum, strat ciśnienia spowodowanych obecnością tego typu czujnika, a także relatywnie niskie koszty jego montażu w instalacji. W przemyśle przepływomierze te najczęściej montowane są kołnierzowo, dławikowo lub przy pomocy zaworu kulowego. Montaż za pomocą zaworu kulowego pozwala na

wprowadzenie i wyjęcie czujnika przy pracującej instalacji (system WET-TAP®). Montaż na pracującej instalacji oraz demontaż bez konieczności zatrzymywania przepływu w przewodzie również umożliwiają również rozwiązania systemu HOT-TAP oraz FLO-TAP. Przykładowe sposoby montażu przepływomierzy z sondami uśredniającymi ciśnienie dynamiczne przedstawiono schematycznie na rys. 11.

a)



b)



Rys. 11 Przykładowe systemy montażu czujnika przepływomierza spiętrzającego ciśnienie:
a) mocowanie dławikowe, b) przez zawór kulowy (WET-TAP) [30]

3. CEL, ZAKRES I TEZA PRACY

Celem pracy jest określenie wpływu zaburzeń generowanych poprzez typowe elementy instalacji na charakterystyki metrologiczne przepływomierzy z rurkami uśredniającymi ciśnienie dynamiczne. Zakres pracy obejmuje zbadanie wpływu elementów zaburzających przepływ takich jak kolano segmentowe $3 \times 30^\circ$, układ kolan segmentowych w różnych płaszczyznach oraz przepustnica w dwóch stopniach otwarcia na wskazania przepływomierzy z rurkami uśredniającymi ciśnienie dynamiczne. Badaniem objęto trzy różne czujniki umieszczone w rurociągu o średnicy 160mm w różnych odległościach od elementu zaburzających przepływ. Czujniki umieszczano w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach (pionowo i poziomo). Badania zrealizowano dla prędkości średniej przepływu w zakresie od 8 do 26m/s.

TEZA PRACY

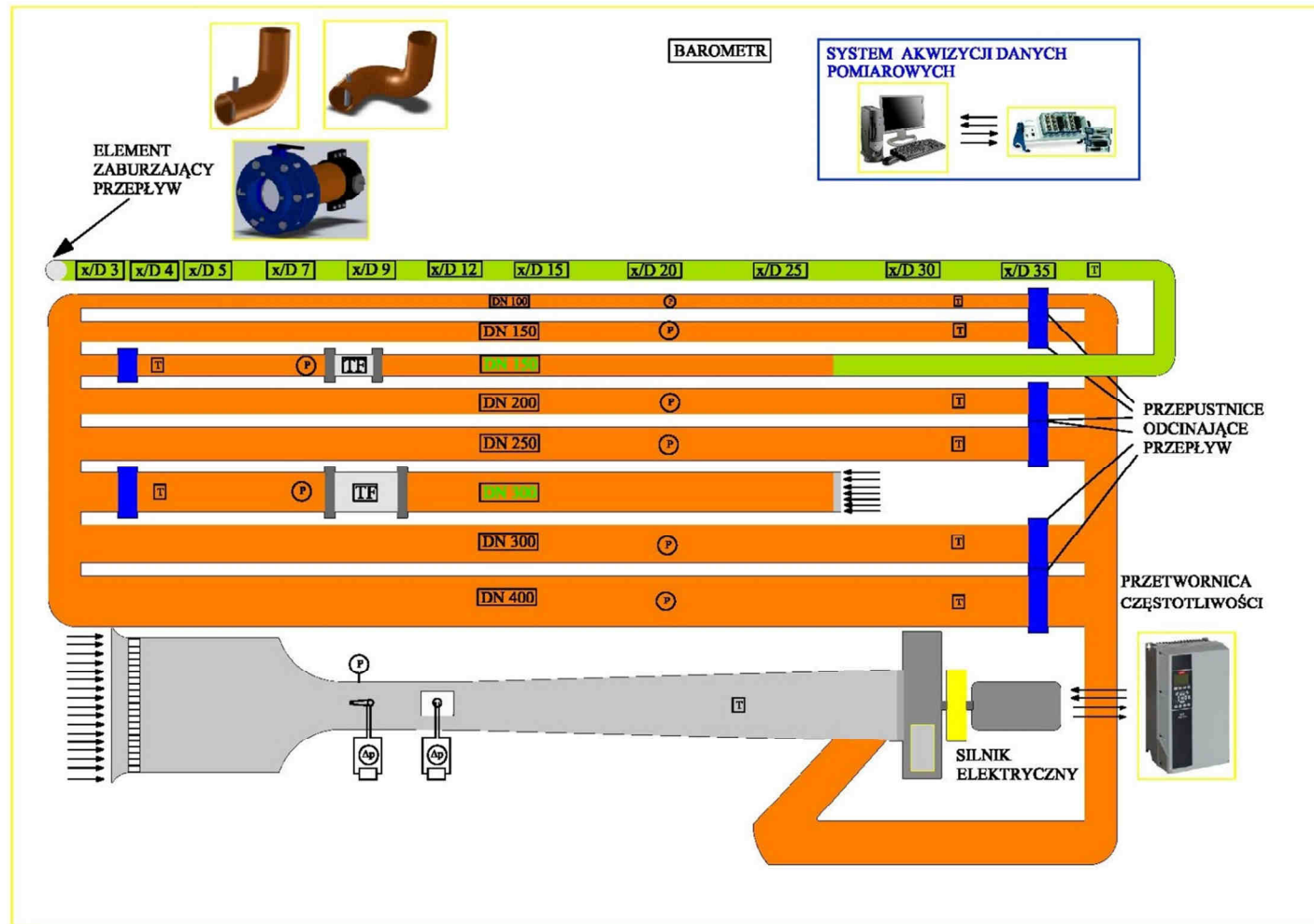
Niejednokrotnie istnieje możliwość umieszczenia przepływomierza z czujnikiem uśredniającym ciśnienie dynamiczne bliżej elementu zaburzającego przepływ niż wynika to z zaleceń związanych ze stopniem rozwinięcia przepływu w rurociągu. Zmiana współczynnika przepływu jest na tyle mała, że pozwala wykorzystać taki pomiar w szeregu zastosowaniach technicznych.

4. BUDOWA STANOWISKA POMIAROWEGO I METODYKA POMIARÓW

Badania eksperymentalne wpływu zaburzeń przepływu na niepewność pomiaru strumienia płynu w zamkniętych kanałach w literaturze podejmowano dla różnych rodzajów przepływomierzy: kryz [4, 9, 41, 42, 43, 67, 90, 91, 93, 94, 97], ultradźwiękowych [8, 69], wirowych [55], elektromagnetycznych oraz turbinowych [16, 56]. W większości przytoczonej literatury, analizowano wpływ różnorodnych kombinacji typowych elementów zaburzających przepływ lub specjalnie skonstruowanych zaburzaczy przepływu na wskazania przepływomierzy. Badania te realizowano najczęściej dla wody lub powietrza. Wielokrotnie analizowanym w literaturze układem zaburzającym był układ dwóch kolan 90° umieszczonych w dwóch płaszczyznach prostopadłych do siebie. W przytoczonych pozycjach literatury strumienie odpowiadały przepływowi turbulentnym, dla liczb Reynoldsa w zakresie $3 \cdot 10^4 \div 5 \cdot 10^5$. Badania realizowane były dla przewodów o średnicach 25,6÷200 mm, z czego mniejsze średnice stosowano w instalacjach, w których czynnikiem była woda. Wpływ elementów zaburzających na wartość wielkości mierzonej wyznaczano w większości cytowanych prac przy pomocy zmiany współczynnika przepływu w przepływie zaburzonym, odnosząc wartość zmierzoną do współczynnika wyznaczonego dla w pełni rozwiniętego przepływu. Wielkość i rodzaj powstałego zaburzenia określano na podstawie profili osiowych i obwodowych składowych prędkości w przekrojach poprzecznych, a rzadziej poprzez rozkłady ciśnień. Wymienione powyżej wielkości przedstawiano w funkcji odległości za elementem zaburzającym przepływ oraz liczby Reynoldsa.

4.1 Opis stanowiska

Zaprojektowano stanowisko pomiarowe, w celu przeprowadzenia badań eksperymentalnych oddziaływania typowych elementów zaburzających na wskazania różnych konstrukcji czujników uśredniających ciśnienie dynamiczne. Projekt przewidywał przeprowadzenie modyfikacji istniejącego stanowiska pomiarowego do badań przepływomierzy. Schemat stanowiska po modyfikacji przedstawiono na rys. 12, natomiast na rys. 13 zaprezentowano jego widok ogólny.



Rys. 12 Schemat stanowiska pomiarowego- rzut z góry, P- pomiar ciśnienia absolutnego, T- pomiar temperatury, TF- przepływomierz turbinowy, x/D- odległość od elementu zaburzającego odpowiadająca wielokrotności średnic rurociągu



Rys. 13 Widok ogólny stanowiska pomiarowego po modyfikacji

Stanowisko składa się z dwóch zasadniczych sekcji pomiarowych: tunelu aerodynamicznego typu otwartego, który pracuje na ssaniu (rys. 14) oraz sekcji rurociągów wraz z przepustnicami i zainstalowanymi przepływomierzami turbinowymi (rys.15). Dzięki takiej konstrukcji stanowiska, możliwe było jego dostosowanie do przeprowadzenia badań na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej.



Rys. 14 Tunel aerodynamiczny



Rys. 15 Sekcja rurociągów przed modyfikacją

Urządzeniem wymuszającym przepływ na stanowisku pomiarowym jest dmuchawa promieniowa o wydajności maksymalnej 12 000 m³/h, która jest napędzana silnikiem trójfazowym o mocy 37 kW (rys.16).



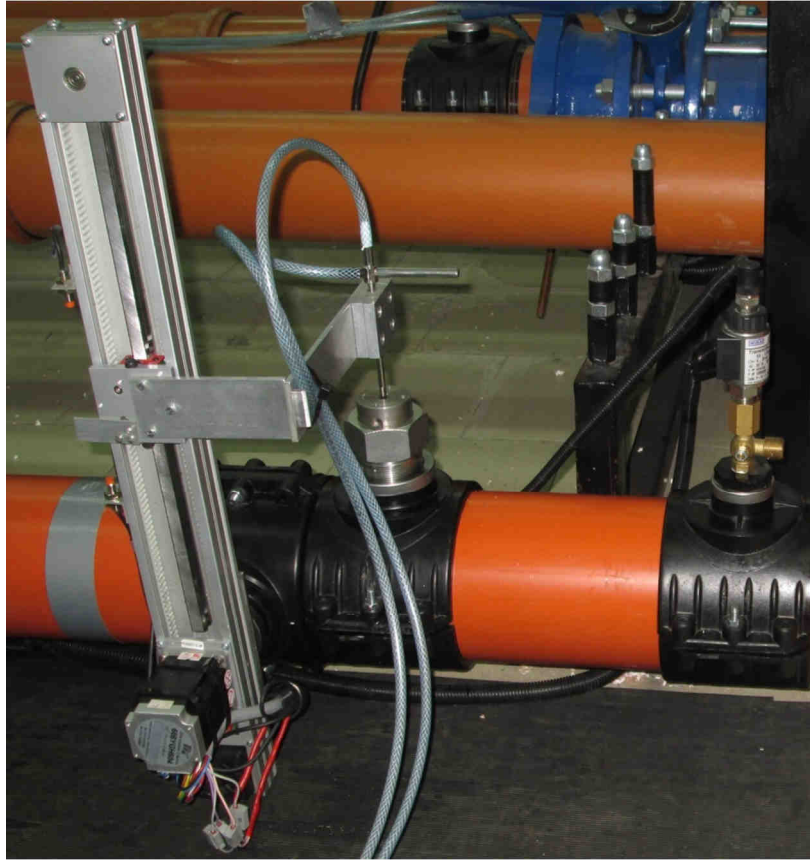
Rys. 16 Zespół wymuszający przepływ- silnik trójfazowy wraz z dmuchawą odśrodkową

Silnik zasilany jest poprzez przetwornicę częstotliwości, dzięki takiemu rozwiązaniu uzyskano możliwość płynnej regulacji obrotów, a co za tym idzie pośrednio możliwość regulacji prędkości przepływu płynu w układzie (rys.17).



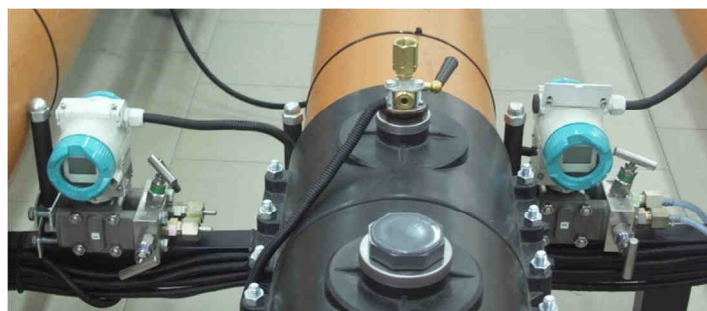
Rys. 17 Przetwornica częstotliwości firmy Danfoss typu VLT HVAC Drive FC 102

Rurociąg o średnicy nominalnej 160 mm, na którym zrealizowano badania zamontowany został na ssaniu wentylatora. Badania prowadzono dla trzech rozwiązań konstrukcyjnych przepływomierzy piętrzących w różnych konfiguracjach układu zaburzającego przepływ. W celu wyznaczenia profili prędkości za układem zaburzającym wykorzystano układ do trawersowania przestrzeni pomiarowej wykorzystujący jako przyrząd mierniczy rurkę Prandtla. Zastosowany w trakcie badań układ pomiarowy do trawersowania przestrzeni pomiarowej przy pomocy rurki Prandtla zbudowany jest z modułu liniowego, silnika krokowego oraz dwóch wyłączników krańcowych. Zastosowanie wyłączników krańcowych dało możliwość ustawienia odpowiedniej odległości, na której miał zostać zrealizowany pomiar, odpowiadającej średnicy rurociągu. Układ pomiarowy do trawersowania przestrzeni pomiarowej przy pomocy rurki Prandtla przedstawiono na (rys. 18).



Rys. 18 Układ pomiarowy do trawersowania przestrzeni pomiarowej

Pomiary różnicy ciśnień wykonywano przy pomocy przetworników różnicy ciśnień firmy SIEMENS SITRANS DSIII o niepewności 0,075% wartości mierzonej, połączonych za pomocą bloku zaworów i przewodów impulsowych z badanymi przepływomierzami (rys.19). Ciśnienie absolutne mierzono przy pomocy przetwornika WIKA typ P-10 (rys.20).

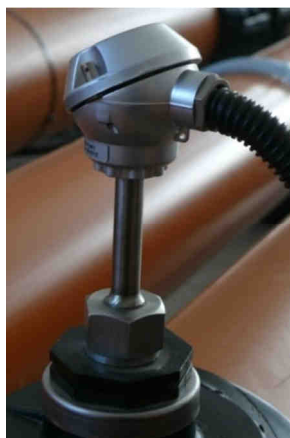


Rys. 19 Przetworniki różnicy ciśnień SIEMENS SITRANS DS III wraz z trójdrogowymi blokami zaworów firmy SCHNEIDER (2kPa, 6kPa i 25kPa)



Rys. 20 Przetwornik ciśnienia absolutnego WIKA typu P-10

Pomiary temperatury płynu w rurociągu realizowano przy pomocy zamontowanych po stronie odpływowej termometrów oporowych Pt-100 (rys. 21).



Rys. 21 Termometr oporowy Pt-100 zainstalowany w rurociągu

Wyposażenie stanowiska w termometry oraz przetworniki ciśnienia absolutnego umożliwiło wyznaczenie strumienia objętości powietrza w miejscu zainstalowania badanych czujników. Zainstalowane w układzie pomiarowym przepływomierze turbinowe firmy SPONSLER o średnicach 150 mm i 300 mm należą do wysokiej klasy i charakteryzuje je niepewność pomiaru poniżej 0,5% wartości mierzonej według informacji podanych przez laboratorium przeprowadzające wzorcowanie (Colorado Engineering Experiment Station Inc.) (rys. 22). Do rurociągu o średnicy DN160 został podłączony układ z możliwością wymiany elementu zaburzającego (kolano segmentowe $3 \times 30^\circ$, układ kolan segmentowych w różnych płaszczyznach odniesienia oraz przepustnica w dwóch stopniach otwarcia), umożliwiającą przeprowadzenie badań których wyniki zamieszczono w niniejszej rozprawie doktorskiej.



Rys. 22 Przepływomierze turbinowe firmy SPONSLEK SP6-CB-PH7-C-4X (DN150) i SP12-CB-PH7-C-4X (DN300) wraz ze wzmacniaczami impulsów

Przepływomierze turbinowe wykorzystano w trakcie realizacji badań do wyznaczenia prędkości średniej płynu w miejscu zainstalowania analizowanych przepływomierzy. Konstrukcja stanowiska pomiarowego, umożliwia wybór przepływomierza referencyjnego oraz dowolnego rurociągu, w którym będzie zainstalowany badany przepływomierz. Takie rozwiązanie daje możliwość realizowania pomiarów przy niskich prędkościach dla przepływomierzy zainstalowanych w rurociągach o większych średnicach przy pomocy przepływomierza referencyjnego o mniejszej średnicy.

W celu wyznaczenia parametrów fizycznych czerpanego podczas trwania badań powietrza, stanowisko wyposażono w barometr i higrometr (rys. 23). Parametry otoczenia śledzono podczas całego cyklu pomiarów.



Rys. 23 Barometr LB-716 (a) i higrometr (b)

Do montażu analizowanych przepływomierzy z rurkami uśredniającymi wykorzystano króciec (w postaci opaski) o średnicy 2” .

4.2 Sposób akwizycji danych pomiarowych

Stanowisko, na którym prowadzone były badania, których wyniki zamieszczono w niniejszej pracy, wyposażone było w oprogramowanie do akwizycji danych pomiarowych. Przedmiotowe oprogramowanie stworzone zostało w środowisku LabVIEW [10].

Regulacje, odczyt oraz zapisywanie danych pomiarowych realizowane były za pośrednictwem kart pomiarowych firmy NATIONAL INSTRUMENTS. Karty pomiarowe zamocowano w obudowie typu CompactDAQ NI cDAQ-9172, którą przedstawiono na rys. 24. Podczas realizacji badań wykorzystano następujące karty pomiarowe [49, 50, 51, 52, 53]:

- **NI 9217** – pomiar rezystancji (termometry oporowe),
- **NI 9203** – wejścia prądowe 4÷20mA (barometr, przetworniki różnicy ciśnień – 2kPa, 6kPa i 25kPa, przetworniki ciśnienia absolutnego, przetwornica częstotliwości),
- **NI 9265** – wyjścia prądowe 4÷20mA (sterowanie przetwornicą częstotliwości),
- **NI 9205** – wejścia częstotliwościowe (przepływomierze turbinowe),
- **NI 9403** – wejścia i wyjścia cyfrowe (silnik krokowy, wyłączniki krańcowe).

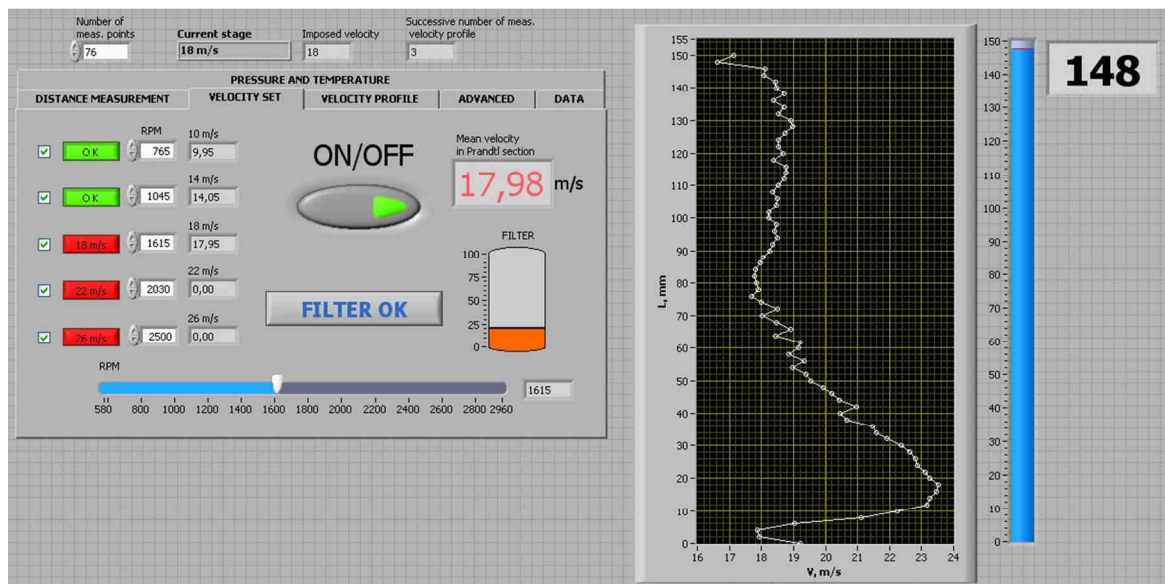


Rys. 24 Karty pomiarowe w systemie CompactDAQ firmy National Instruments

Sygnal pomiarowy przekazywany był do komputera klasy PC poprzez złącze USB. Komputer wykorzystywany do akwizycji danych znajdował się w pomieszczeniu, w którym prowadzono

pomiary. W związku z dużym natężeniem hałasu zdecydowano się na zdalną obsługę systemu pomiarowego. Zastosowanie zdalnego pulpitu umożliwiło obsługę systemu pomiarowego z pomieszczenia oddalonego od miejsca prowadzenia badań, co wpłynęło na poprawę bezpieczeństwa oraz komfortu ich prowadzenia. W trakcie realizacji badań wykorzystywano dwa programy. Jeden do wizualizacji i akwizycji danych dotyczących profili prędkości, a drugi do wyznaczania współczynnika przepływu K badanych rozwiązań konstrukcyjnych przepływomierzy piętujących.

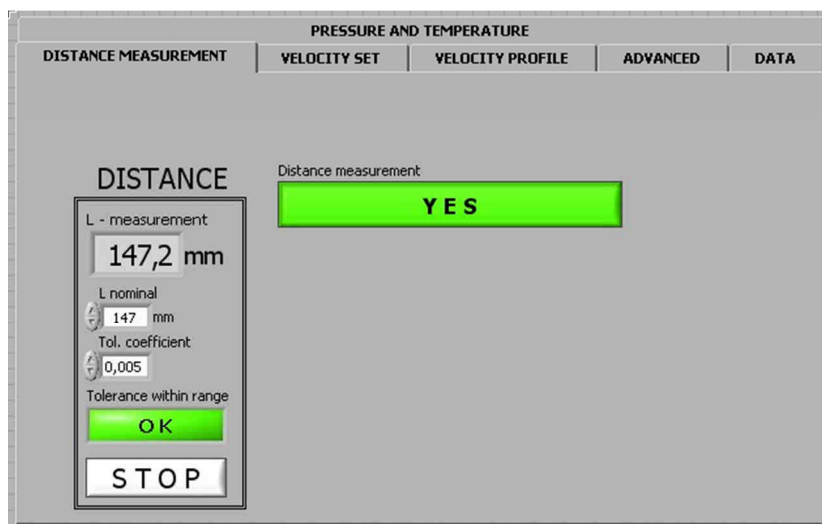
Program do akwizycji danych pomiarowych dotyczących profili prędkości ma możliwość ich graficznego zapisu w czasie rzeczywistym oraz zapisu danych pomiarowych do pliku. W trakcie realizacji pomiarów operator informowany jest o aktualnym położeniu rurki Prandtla w przekroju pomiarowym rurociągu. W związku z przyjętym zakresem prędkości średnich od 10 do 26 m/s, wybrano 3 prędkości z krokiem co 8 m/s (10m/s, 18m/s oraz 26m/s). Użytkownik dokonuje wyboru, przy których prędkościach zrealizowany zostanie pomiar. Po zrealizowaniu serii pomiarowej następuje zmiana statusu na „OK”, po prawej stronie wyświetlane są obroty silnika dmuchawy, przy których osiągnięto wymaganą prędkość. Ostatecznie zapamiętywana i wyświetlana jest rzeczywiście osiągnięta wartość prędkości (tolerancja $\pm 0,1$ m/s). Na rys. 25 przedstawiono oprogramowanie do akwizycji danych - profile prędkości.



Rys. 25 Oprogramowanie do akwizycji danych- profile prędkości

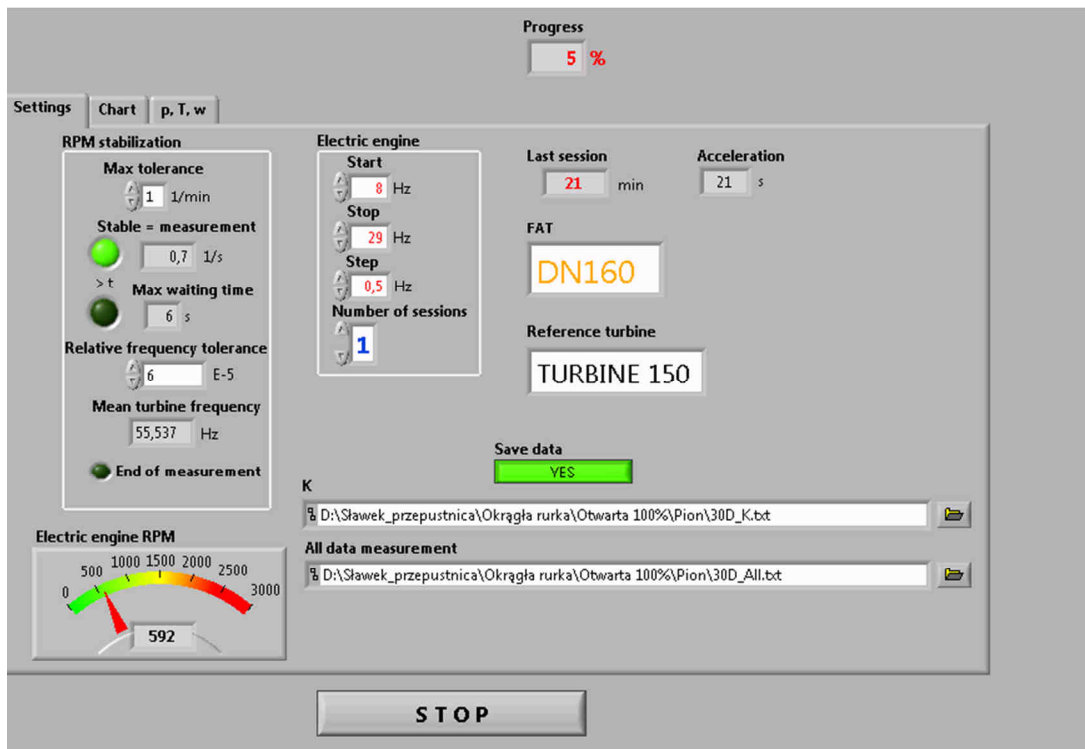
Pomiar rozpoczyna się od wyznaczenia rzeczywistej odległości pomiędzy dwoma wyłącznikami krańcowymi (rys. 26). Określono w stosownym polu (L nominalne) nominalną odległość pomiędzy pierwszym i ostatnim punktem pomiarowym

(odległość punktu od ścianki zgodnie z normą [62] to $0,03 D$). Gdy odległość mieści się w określonych granicach tolerancji, następuje uruchomienie silnika dmuchawy i rozpoczęcie właściwych pomiarów dla uprzednio zdefiniowanych prędkości średnich. Zalety oraz specyfikę tego oprogramowania szczegółowo przedstawiono w [35, 37].



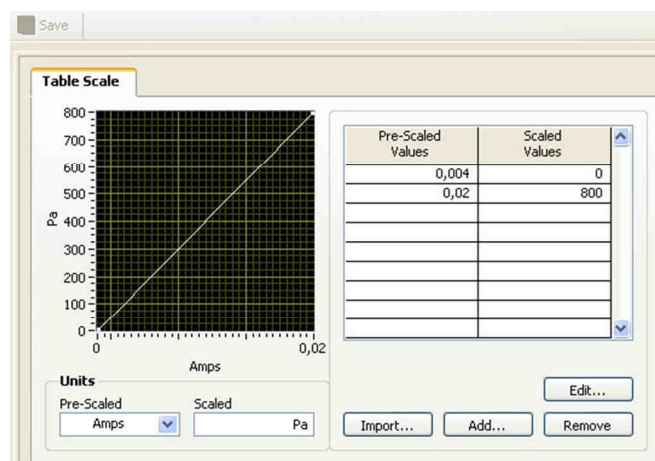
Rys. 26 Pomiar odległości pomiędzy wyłącznikami krańcowymi

Drugi program wykorzystywany podczas realizacji badań dotyczących wyznaczenia współczynnika przepływu K w funkcji prędkości średniej dał możliwość bezpośredniej rejestracji wielu danych pomiarowych. Dzięki uprzednio zdefiniowanym zależnościom pomiędzy sygnałami pobieranymi bezpośrednio z czujników: temperatury, ciśnienia absolutnego, przepływomierza turbinowego oraz różnicy ciśnień na badanym przepływomierzu, możliwa była obserwacja w czasie rzeczywistym wyników pomiarów oraz ich automatyczna akwizycja. Obustronna komunikacja programu z przetwornicą częstotliwości (wyjście i wejście $4\div 20\text{mA}$) umożliwiła precyzyjne ustawienie obrotów silnika. Oprogramowanie daje możliwość ustalenia prędkości początkowej oraz końcowej obrotów silnika dmuchawy, jak i wartości wzrostu prędkości (krok) obrotów silnika. Oprogramowanie umożliwia również ustawienie częstotliwości próbkowania, oraz czasu rejestracji próbek. Przed przystąpieniem do badań dokonywano wyboru przepływomierza turbinowego, który daje możliwość wyznaczenia prędkości średniej z określoną niepewnością. Ekran oprogramowania do badania przepływomierzy piętujących umieszczonych w zaburzonej strudze płynu przedstawiono na rys. 27.



Rys. 27 Oprogramowanie do akwizycji danych – wyznaczanie współczynnika przepływu K

Sygnaly przekazywane wprost z czujników pomiarowych przekształcane są w programach na odpowiednie wielkości poprzez zdefiniowane skale. Oprogramowanie na przykład zamienia sygnał prądowy z przetworników różnicy ciśnień, barometru oraz rurki Prandtla na ciśnienie wyrażone w Pa, a sygnał częstotliwościowy z przepływomierzy turbinowych na prędkość wyrażoną w m/s. Przykładowe przekształcanie sygnału przedstawiono na rys. 28.



Rys. 28 Przekształcanie sygnału surowego na jednostki docelowe dla rurki Prandtla (przetwornik Δp 2kPa) [65]

Zarówno program do wyznaczania współczynnika przepływu jak i program do wyznaczania profili prędkości mają możliwość przzerwania pomiarów (i zapisania wyników) w dowolnym momencie po uprzednim naciśnięciu przycisku STOP.

5. NIEPEWNOŚĆ WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKA PRZEPLYWU K BADANYCH PRZEPLYWOMIERZY

Niepewność pomiaru jest wielkością związaną z końcowym wynikiem pomiaru. Pomiar charakteryzuje rozrzut jego wartości, który można w pewien sposób przypisać wartości mierzonej. Wewnątrz przedziału tych wartości można z oczekiwanym prawdopodobieństwem umieścić wartość wielkości mierzonej. Problematykę niepewności pomiaru można tradycyjnie wiązać z opublikowaniem w latach 1993 i 1995 Przewodnika GUM jako podstawowego dokumentu dotyczącego jej wyrażania [27]. Tematyką niepewności pomiaru w swojej pracy naukowej zajmował się m.in. Fotowicz, autor artykułów traktujących o tym zagadnieniu [17, 18, 19, 20]. Niepewność pomiaru można wyznaczyć dwiema metodami, A lub B. Metoda A oparta jest na analizie statystycznej serii badań

i w tym przypadku jest odchyleniem standardowym eksperymentalnym średniej otrzymanej metodą uśredniania i dotyczy niepewności przypadkowych. Druga z metod, B polega na analizie naukowej opartej na wszystkich dostępnych informacjach o możliwej zmienności wielkości składowych i dotyczy niepewności systematycznej. W analizie wyników pomiarów można również wyznaczać tak zwany błąd grubo, np. pomyłkowe podanie wartości w innych jednostkach. Podczas prowadzenia badań błąd grubo nie powinien występować, jednak w przypadku pojawienia się pomiaru obarczonego tego typu błędem, nie należy brać go pod uwagę w chwili wykonywania analizy niepewności pomiaru.

Ze względu na charakter prowadzonych badań, opracowanie wyników pomiarów, nie byłoby poprawne bez rzetelnie wykonanej analizy niepewności pomiarowej. W publikacji [39] Kabza podejmuje temat analizy wpływu niepewności pomiarowej na wskazania przepływomierzy z rurkami uśredniającymi ciśnienie dynamiczne szczególnie w przypadku, gdy zachodzi konieczność zainstalowania przepływomierza w miejscach, gdzie z braku wystarczająco długich odcinków prostych przewodu występuje deformacja profilu prędkości.

Współczynnik przepływu K jest stały od pewnej wartości liczby Re dla większości przepływomierzy z rurkami spiętrzającymi a niepewność określania jego wartości δK zawiera się w przedziale $1 \div 1,5\%$ [38]. W przypadku realizacji pomiaru strumienia przy niższych

wartościach liczby Reynoldsa należy skorygować wartość K w systemie pomiarowym. Przedstawiona powyżej niepewność zawiera również wpływ intensywności turbulencji oraz efektów związanych ze ściśliwością gazów na wartość K .

Wyznaczenie współczynnika przepływu K , a także niepewności jego pomiaru wymaga znajomości średnicy rurociągu, gęstości płynu, różnicy ciśnień i niepewności wyznaczenia tych wielkości [45, 61, 64, 78, 85, 95].

Zależność określającą współczynnik przepływu K otrzymano przekształcając wzór (1)

$$K = w \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta p}}. \quad (7)$$

Po połączeniu wzoru na strumień objętości q_v ze średnią prędkością w przepływie otrzymano zależność

$$K = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{q_v}{D^2} \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta p}}. \quad (8)$$

Niepewność wyznaczania współczynnika przepływu przy założeniu 95% poziomu ufności wyrażono wzorem:

$$\delta K = \sqrt{\left(\frac{\partial K}{\partial q_v}\right)^2 (\delta q_v)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial D}\right)^2 (\delta D)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial \rho}\right)^2 (\delta \rho)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial \Delta p}\right)^2 (\Delta p)^2}. \quad (9)$$

Pochodne cząstkowe (współczynniki czułości) we wzorze (9) przyjmują wartości:

$$\frac{\partial K}{\partial q_v} = \frac{K}{q_v}$$

$$\frac{\partial K}{\partial D} = -2 \frac{K}{D}$$

$$\frac{\partial K}{\partial \rho} = \frac{1}{2} \frac{K}{\rho}$$

$$\frac{\partial K}{\partial \Delta p} = -\frac{1}{2} \frac{K}{\Delta p}$$

Wzór (9) po przekształceniach, przyjmuje postać

$$\frac{\delta K}{K} = \left(\left(\frac{\delta q_v}{q_v} \right)^2 + 4 \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} . \quad (10)$$

Niepewność wyznaczania gęstości powietrza $\frac{\delta \rho}{\rho}$ jest sumą niepewności danych tablicowych oraz niepewności pomiaru jego ciśnienia i temperatury. W obliczeniach pominięto niepewność danych tablicowych jako znacznie mniejszą od niepewności wprowadzanej przy pomiarze ciśnienia i temperatury.

W chwili, gdy wzięto pod uwagę równanie stanu gazu

$$\rho = \frac{p}{RT}, \quad (11)$$

i wyznaczono współczynniki czułości, po przekształceniach, otrzymano

$$\frac{\delta \rho}{\rho} = \left(\left(\frac{\delta p}{p} \right)^2 + \left(\frac{\delta T}{T} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} . \quad (12)$$

Niepewność wyznaczenia średnicy rurociągu $\frac{\delta D}{D}$ jest zależna od zachowania kołowego kształtu rurociągu oraz klasy użytego narzędzia pomiarowego. W trakcie realizacji badań stwierdzono zachowanie przekroju kołowego badanych rurociągów. Tolerancje utrzymania średnicy rurociągu zaczerpnięto z dokumentacji podanej przez producenta i przyjęto je jako δD . Informacje te podano w tabeli 3.

Tab. 3 Wymiary i tolerancje wymiarów rurociągów

DN	ścianka s, mm	średnica wewnętrzna D, mm		$\delta D, \%$
		min	max	
160	4	152	152,4	0,26

W tabeli 4 zestawiono urządzenia pomiarowe wykorzystywane podczas prowadzenia badań wraz z ich deklarowanymi niepewnościami pomiarowymi.

Tab. 4 Wykaz urządzeń wykorzystywanych podczas badań

Wartość mierzona	Urządzenie	Nazwa producenta/ Typ	Niepewność pomiaru (względna)
strumień objętości	przepływomierz turbinowy	SPONSLER / SP6-CB-PH7-C-4X (DN150)	±0,5%
ciśnienie absolutne	przetwornik	WIKA / P-10	±0,1%
temperatura	czujnik temperatury	ALF SENSOR/ TOP-Pm 26 - Pt 100	±0,15+0,002t
różnica ciśnień	przetwornik różnicy ciśnień	SIEMENS / SITRANS DS III	±0,075%

Wilgotność powietrza w trakcie realizacji pomiarów zmieniała się w zakresie 20÷30%, co uwzględniono w obliczeniach.

Przykładowo, dla temperatury powietrza 10°C i ciśnienia 96 kPa niepewność wyznaczenia gęstości wynosi 0,11%. W przypadku rurociągu DN 160 mm niepewność wyznaczenia średnicy wewnętrznej wynosi 0,2%. W tym przypadku niepewność wyznaczenia współczynnika przepływu $\frac{\delta K}{K}$ obliczona w oparciu o wzór (10) wynosi 0,71%.

Niepewność ta w zakresie mierzonych ciśnień i temperatur powietrza, przy stałej niepewności wyznaczania strumienia oraz stałej niepewności pomiaru różnicy ciśnień jest praktycznie stała i zawiera się w granicach ±0,71%.

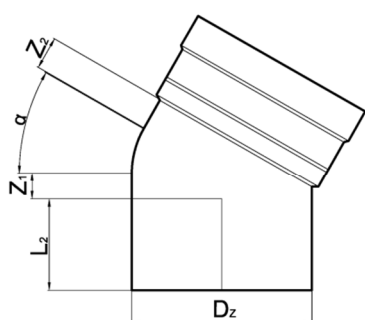
6. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH I ICH ANALIZA

6.1 Wyniki badań eksperymentalnych

Badania zamieszczone w niniejszej pracy realizowano dla czterech elementów zaburzających przepływ:

- kolano segmentowe $3 \times 30^\circ$,
- układ dwóch kolan segmentowych $3 \times 30^\circ$ w różnych płaszczyznach, będących pod kątem 90° względem siebie
- przepustnicy otwartej w 100%,
- przepustnicy otwartej w 50%.

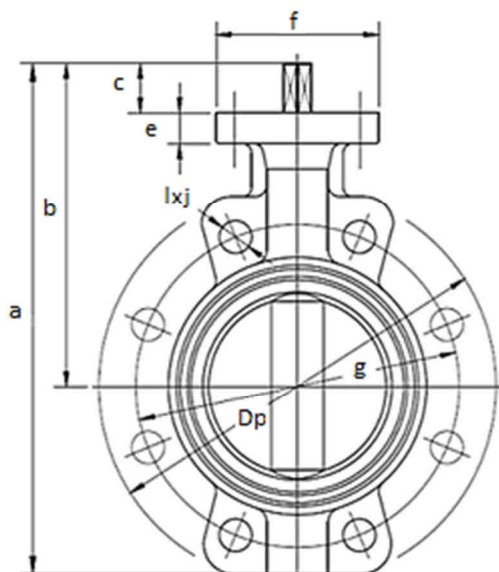
Wszystkie analizowane kolana pochodziły od tego samego producenta, a ich charakterystyczne wymiary przedstawiono na rysunku rys. 29.



D_z (mm)	α ($^\circ$)	Z_1 (mm)	Z_2 (mm)	L_2 (mm)
160	30	23	29	81

Rys. 29 Charakterystyczne wymiary analizowanego kolana [54]

Badana przepustnica jest przepustnicą dwustronnego działania, która może być stosowana dla różnych mediów takich jak: woda przemysłowa, morska i pitna, oleje napędowe i opałowe, ścieki komunalne, powietrze, gaz oraz inne czynniki neutralne w zależności od zastosowanych materiałów na wkładkę uszczelniającą. Na rys. 30 przedstawiono charakterystyczne wymiary badanej przepustnicy. Maksymalne prędkości przepływu, które podaje producent, dla czynników ciekłych wynoszą 4 m/s, natomiast dla czynników gazowych 30 m/s [48].




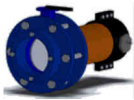
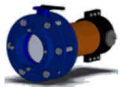





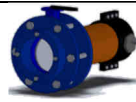
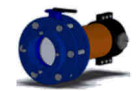



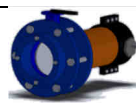
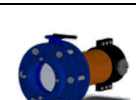
DN	f	c	e	b	a	D _p	g	l	j	Masa
mm									szt.	kg
160	90	30	15	223	357	285	240	23	8	12

Rys. 30 Charakterystyczne wymiary analizowanej przepustnicy [48]

Badaniami objęto trzy rozwiązania konstrukcyjne przepływomierza piętrzącego przepływ umieszczanego w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach dla kilku odległości od elementu zaburzającego. W tabeli 5 zestawiono wszystkie przebadane warianty konfiguracyjne instalacji.

Tab. 5 Zestawienie analizowanych wariantów konfiguracji instalacji

Badany przepływomierz	Układ zaburzający		Względna odległość od elementu zaburzającego przepływ w przepływomierzu (x/D)
	Kolano segmentowe 3x30°		3, 4, 5, 7, 9, 12, 15, 20
	Układ kolan segmentowych różnych płaszczyznach, będących pod kątem 90° względem siebie		3, 4, 5, 7, 9, 12, 15, 20, 22, 25, 30, 35
	Przepustnica otwarta w 100%		3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35
	Przepustnica otwarta w 50%		3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35

Badany przepływomierz	Układ zaburzający		Względna odległość od elementu zaburzającego przepływ w przepływomierzu (x/D)
	Kolano segmentowe 3x30°		3, 4, 5, 7, 9, 12, 15, 20
	Układ kolan segmentowych różnych płaszczyznach, będących pod kątem 90° względem siebie		3, 4, 5, 7, 9, 12, 15, 20, 22, 25, 30, 35
	Przepustnica otwarta w 100%		3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35
	Przepustnica otwarta w 50%		3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35
	Kolano segmentowe 3x30°		3, 4, 5, 7, 9, 12, 15, 20
	Układ kolan segmentowych różnych płaszczyznach, będących pod kątem 90° względem siebie		3, 4, 5, 7, 9, 12, 15, 20, 22, 25, 30, 35
	Przepustnica otwarta w 100%		3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35
	Przepustnica otwarta w 50%		3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35

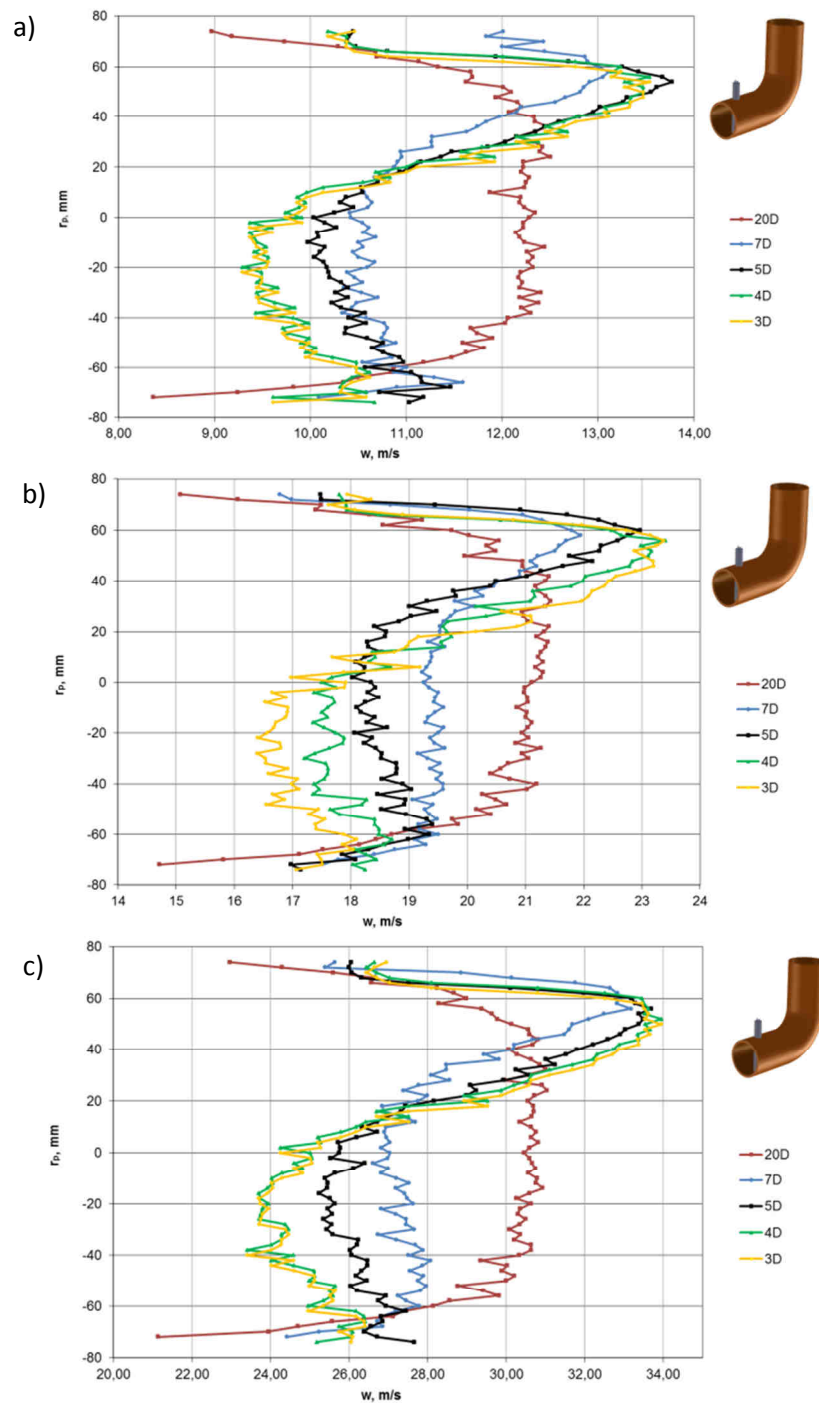
We wszystkich rozwiązaniach konstrukcyjnych rurki uśredniającej zastosowano sześć otworów impulsowych po stronie napływowej, rozmieszczonych zgodnie z regułą podziału okręgu na współśrodkowe pierścienie o takiej samej powierzchni. Otwory odbioru podciśnienia umieszczone były w różnych miejscach w zależności od konstrukcji sondy. Badania realizowano dla prędkości mierzonej przy pomocy przepływomierza referencyjnego w zakresie $8,0 \div 30 \text{ m/s}$.

Ponadto we wszystkich miejscach instalowania przepływomierzy piętrzących wyznaczono profil prędkości przy pomocy rurki Prandtla.

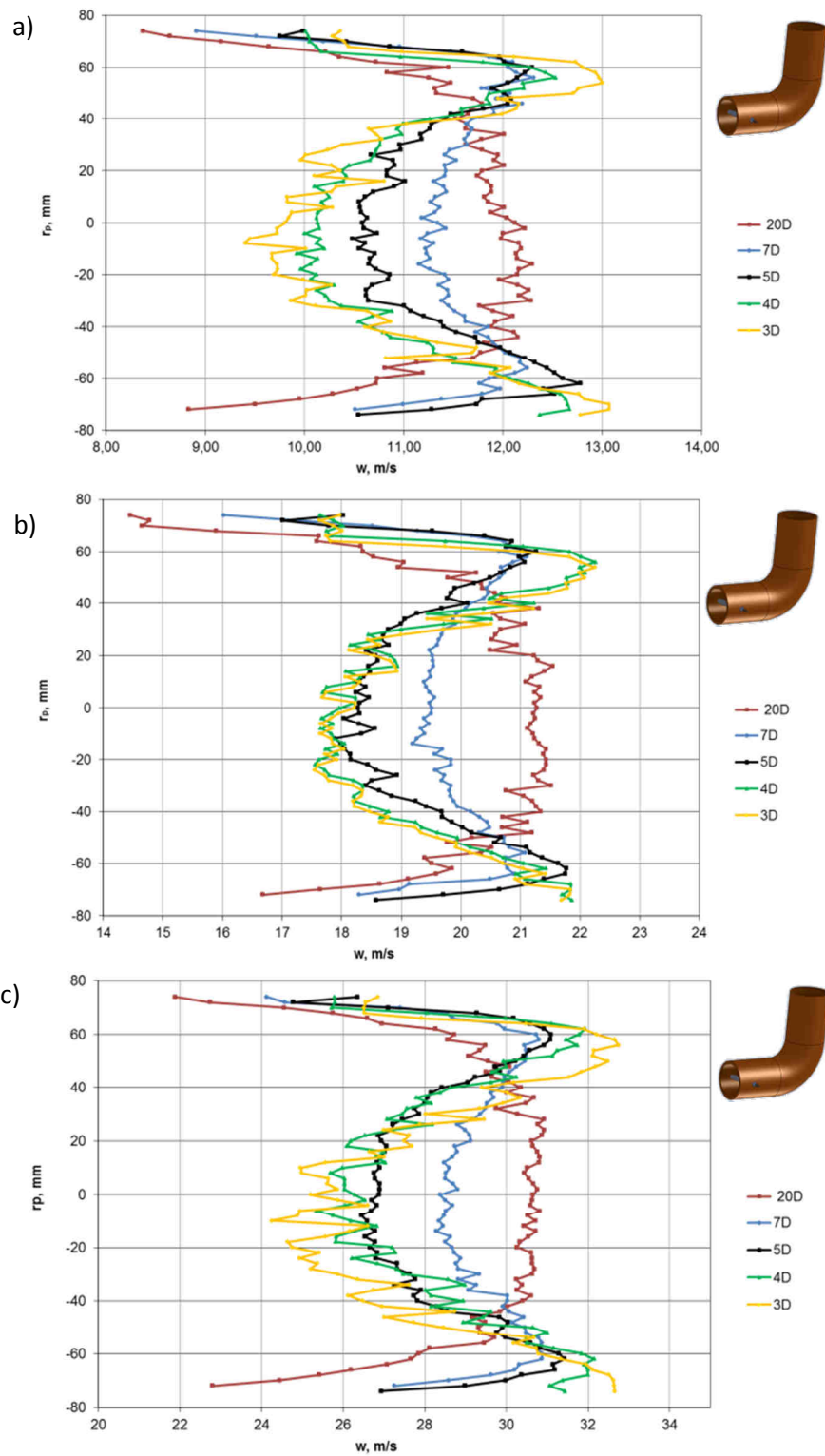
Pomiary odniesienia wykonano na prostym odcinku rury w odległości $x/D=35$. Początek rurociągu stanowiła rura zwrócona kielichem do strony wlotowej. Analizowane elementy instalacji montowane były w odległości $x/D=20$ średnic równoważnych od wlotu.

6.1.1 Wyniki badań analizowanych konstrukcji sond piętujących w warunkach zaburzonego przepływu kolanem segmentowym $3 \times 30^\circ$

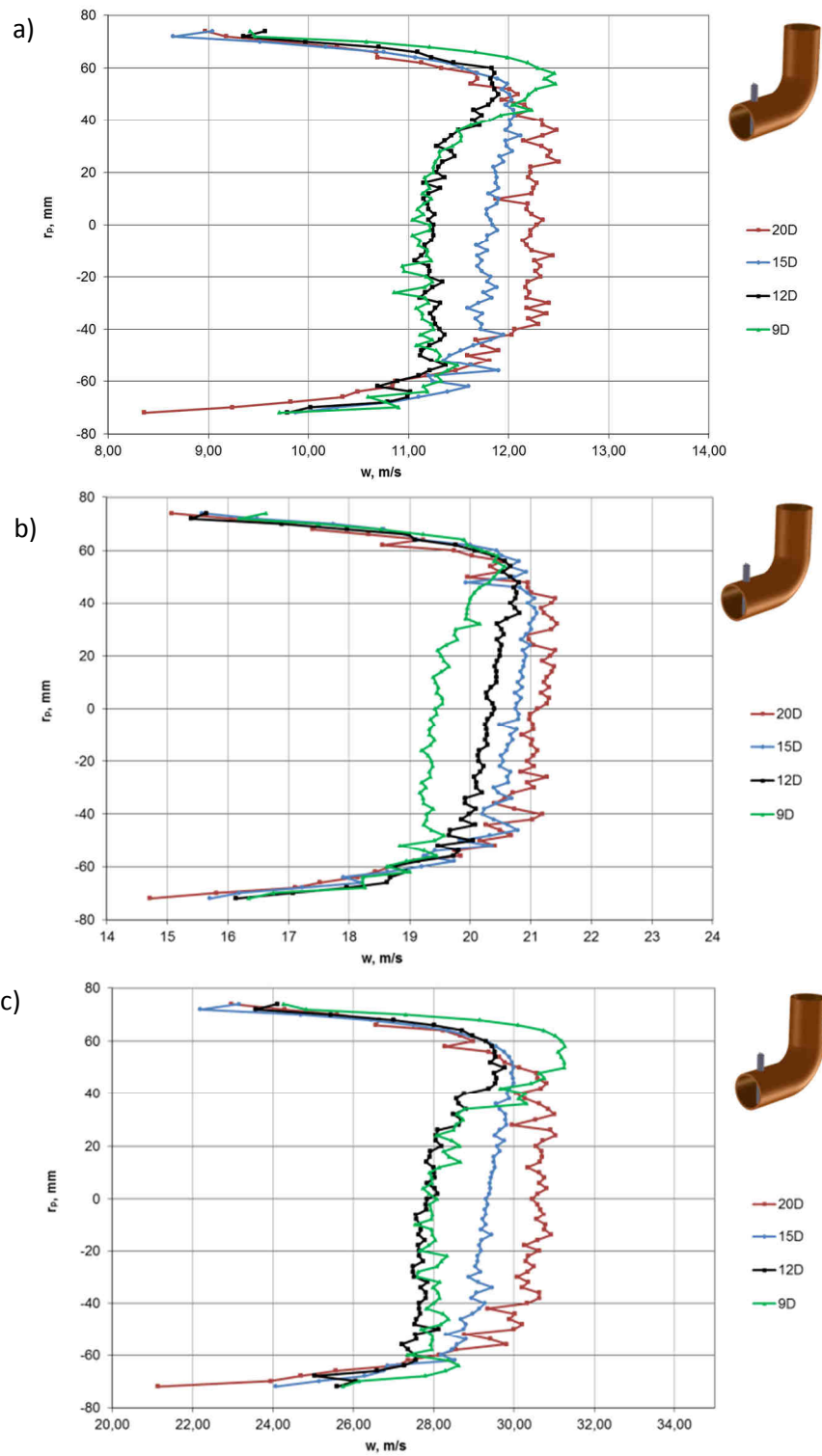
Na rys. 31 ÷ 34 przedstawiono wyznaczone profile prędkości w odległościach i płaszczyznach za kolanem, w których umieszczane były badane przepływomierze. Profile te wyznaczono dla trzech różnych średnich prędkości przepływu, odpowiednio 10m/s, 18m/s, 26m/s.



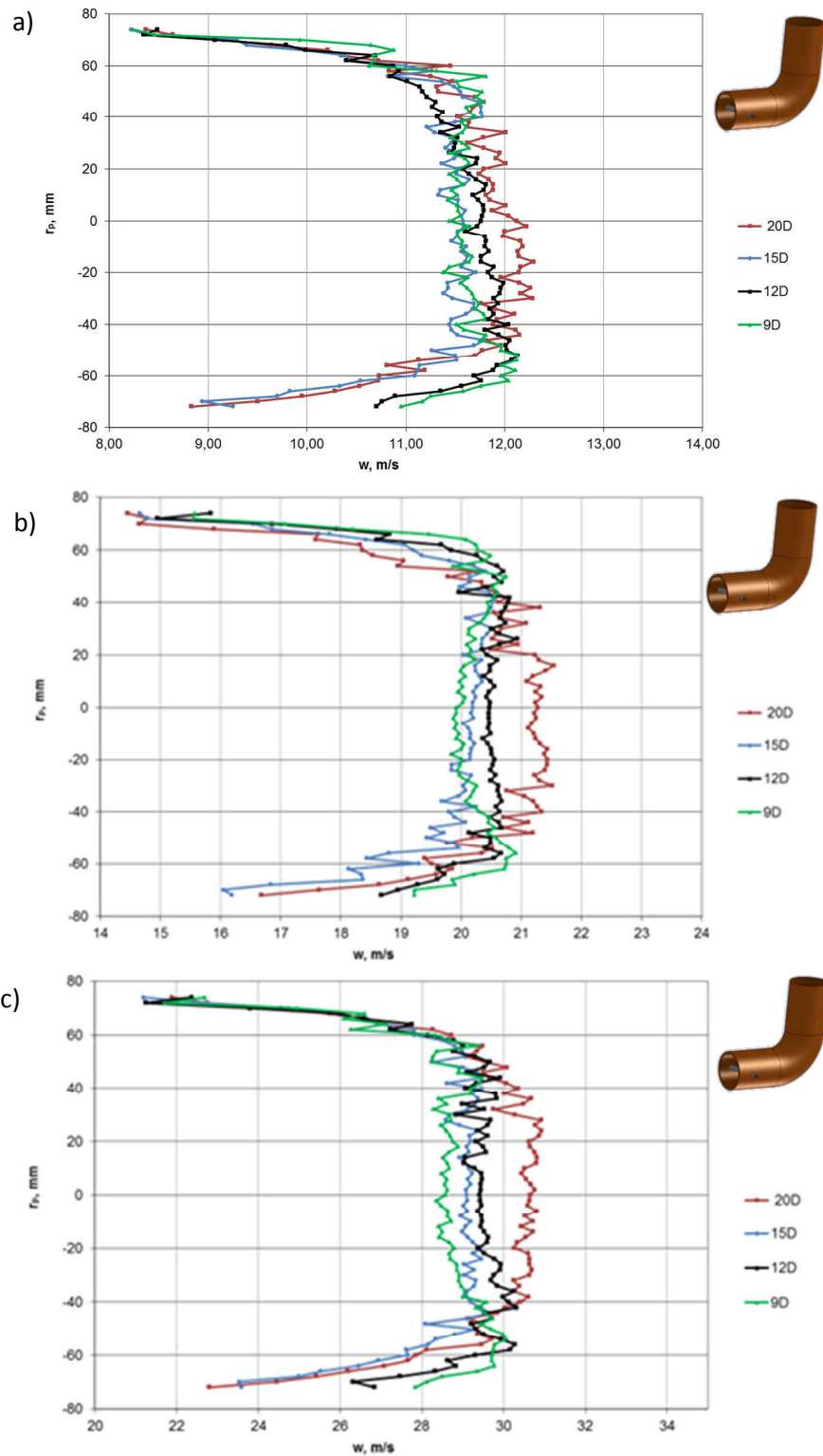
Rys. 31 Profile prędkości w odległościach 3D, 4D, 5D, 7D, 20D od elementu zaburzającego w postaci kolana segmentowego $3 \times 30^\circ$, położenie pionowe sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a) 10,00m/s, b) 18,00m/s, c) 26,00m/s



Rys. 32 Profile prędkości w odległościach 3D, 4D, 5D, 7D, 20D od elementu zaburzającego w postaci kolana segmentowego $3 \times 30^\circ$, położenie poziome sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a) 10,00 m/s, b) 18,00 m/s, c) 26,00 m/s



Rys. 33 Profile prędkości w odległościach 9D, 12D, 15D, 20D od elementu zaburzającego w postaci kolana segmentowego $3 \times 30^\circ$, położenie pionowe sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich:
a) 10,00 m/s, b) 18,00 m/s, c) 26,00 m/s



Rys. 34 Profile prędkości w odległościach 3D, 4D, 5D, 7D, 20D od elementu zaburzającego w postaci kolana segmentowego 3x30°, położenie poziome sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a)10,00m/s, b)18,00m/s, c)26,00m/s

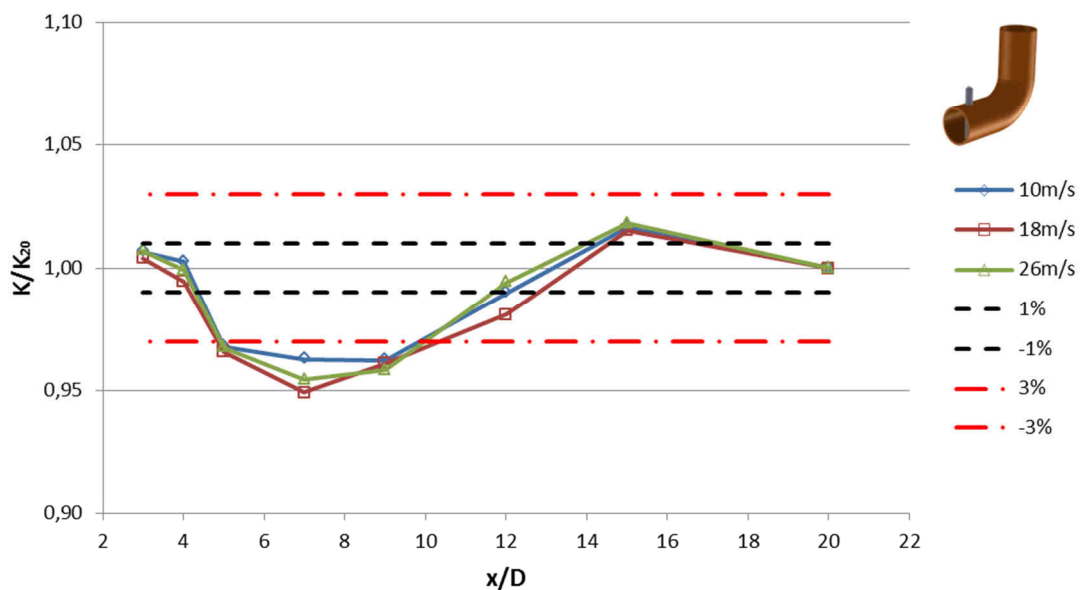
Prędkość średnia w trakcie pomiarów ulegała fluktuacji w zakresie: $w_{sr} = 9,93 \div 10,01$ co odpowiada zmianom liczby Reynoldsa w zakresie $Re = 9,63 \times 10^4 \div 9,71 \times 10^4$, $w_{sr} = 17,87 \div 18,08$ co odpowiada zmianom liczby Reynoldsa w zakresie $Re = 1,73 \times 10^5 \div 1,75 \times 10^5$, $w_{sr} = 25,83 \div 26,01$ co odpowiada zmianom liczby Reynoldsa w zakresie $Re = 2,50 \times 10^5 \div 2,52 \times 10^5$. Zamieszczone w niniejszej pracy wyniki badań dotyczące profili prędkości składają się z 72 punktów pomiarowych. Prędkość lokalna w pojedynczym punkcie jest wynikiem uśredniania pomiarów w czasie 15s. W ciągu jednej sekundy aparatura pomiarowa rejestruje 58 pomiarów wartości prędkości lokalnej. Wartości prędkości lokalnych w punktach pomiarowych przedstawione na wykresach 31÷34 są zatem wynikiem uśredniania 870 pomiarów. Na wykresach 31÷34 przedstawiono profile prędkości dla dwóch położań sondy pomiarowej. Prędkość średnia (mierzona przy pomocy przepływomierza turbinowego) w trakcie realizacji badań, zmieniała się w zakresie $\pm 3\%$ wartości zadanej, co mogło mieć wpływ na wyniki pomiarów prędkości lokalnych. Zmiany te wynikają z działania układu automatyki dostosowującego pracę przetwornicy częstotliwości i dmuchawy do zadanej prędkości średniej w rurociągu. Dla położenia pionowego rys. 31 oraz rys. 33 profile prędkości wykazują silnie asymetryczny rozkład prędkości miejscowych aż do odległości odpowiadającej 12 średnic rurociągu od układu zaburzającego. Tak duża deformacja profilu prędkości może mieć istotny wpływ na pomiar wszelkiego rodzaju przepływomierzami uśredniającymi ciśnienie dynamiczne. Profile prędkości przedstawione na rys. 32 oraz rys. 34 są wynikiem badań zrealizowanych podczas ustawienia poziomego układu pomiarowego. Profil prędkości już we względnej odległości 9 średnic od elementu zaburzającego jest bliski profilowi który przyjęto jako w pełni rozwinięty. Dla układu zaburzającego w postaci kolana segmentowego założono odległość od elementu zaburzającego równą 20-tu średnic rurociągu, jako odległość gdzie profil ulega stabilizacji, jest w pełni rozwinięty. Stosunek $\frac{w_{sr}}{w_{max}}$ w odległości 20-tu średnic jest zgodny z danymi literaturowymi [34]. Ze względu na silnie asymetryczny profil prędkości przeprowadzono szczegółową analizę wyznaczonych profili prędkości, którą zamieszczono w załączniku nr 1.

Wpływ zaburzenia strugi na wskazania przepływomierza analizowano wyznaczając współczynnik przepływu K dla danej lokalizacji przepływomierza i odnosząc go do wartości K_{20} czyli wartości tego współczynnika w odległości 20 średnic rurociągu od kolana segmentowego, gdzie przyjęto, że profil prędkości jest w pełni rozwinięty. Na rys. 35 ÷ 40 podano wartości K/K_{20} dla trzech badanych przepływomierzy umieszczonych w płaszczyźnie kolana (pionowej) i prostopadłej do niej dla wybranych miejsc położenia czujnika,

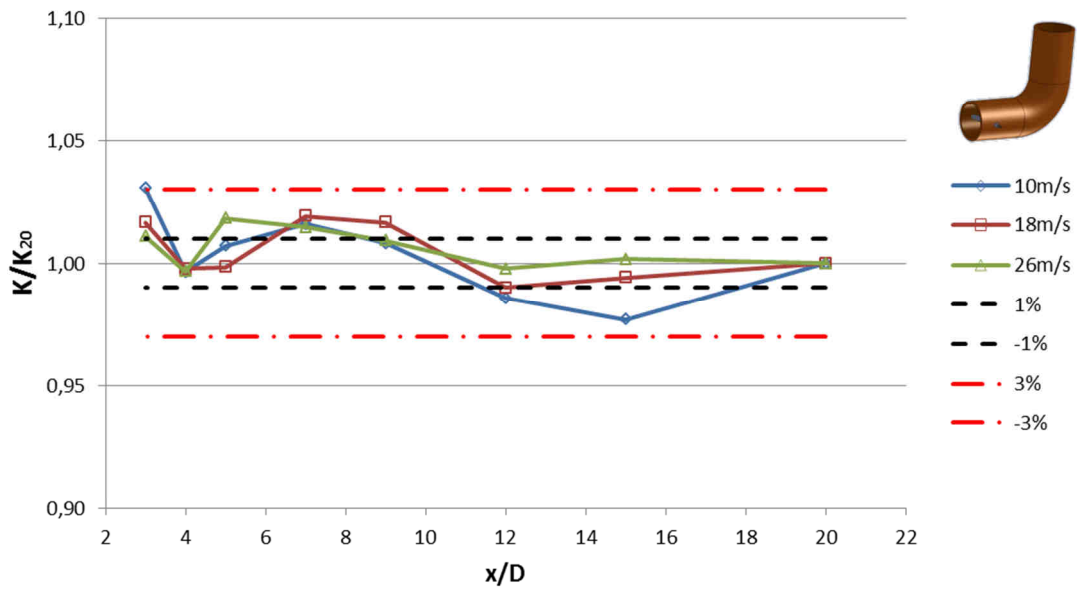
dla wszystkich analizowanych prędkości. W załączniku nr 3 zamieszczono dane pomiarowe wartości współczynnika przepływu K w funkcji prędkości, dla wszystkich analizowanych konstrukcji sond piętujących, dla elementu zaburzającego w postaci układu kolan segmentowych $3 \times 30^\circ$. Współczynnik przepływu K wyznaczano w danej chwili biorąc pod uwagę w obliczeniach chwilową wartość strumienia objętości q_v oraz chwilową wartość różnicy ciśnień Δp . Następnie wyznaczano średnią wartość współczynnika przepływu K , korzystając z zależności:

$$K = \frac{1}{n_p} \sum K_{np}, \quad (13)$$

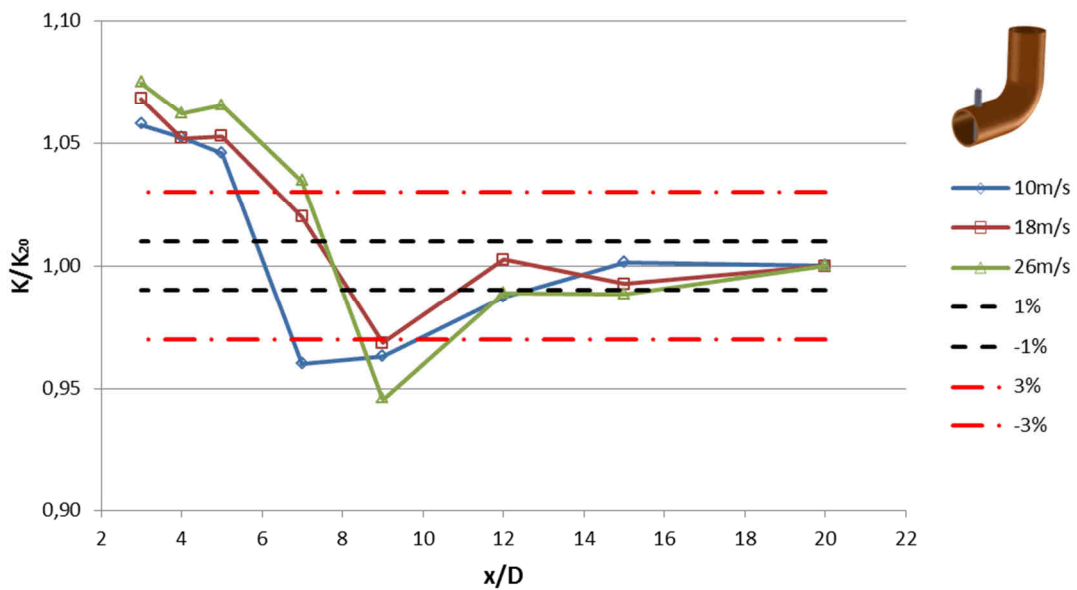
gdzie n_p liczba pomiarów. Jeden punkt w załącznikach nr 3 ÷ 6 jest efektem uśredniania liczby 1102 pomiarów realizowanych w układzie pomiarowym.



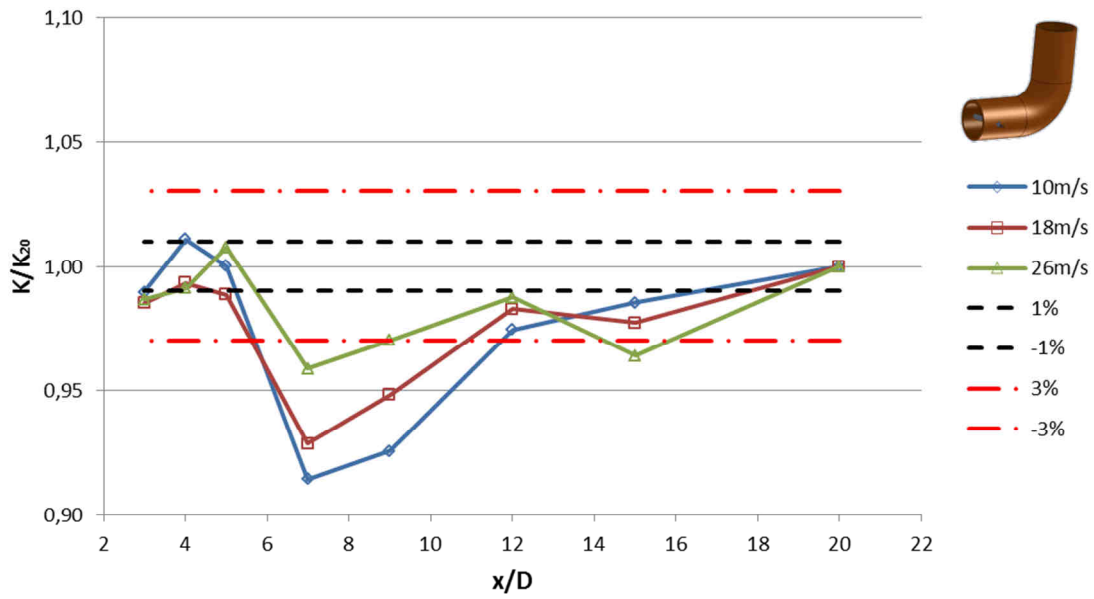
Rys. 35 Współczynniki przepływu K/K_{20} przepływomierza Introbar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy



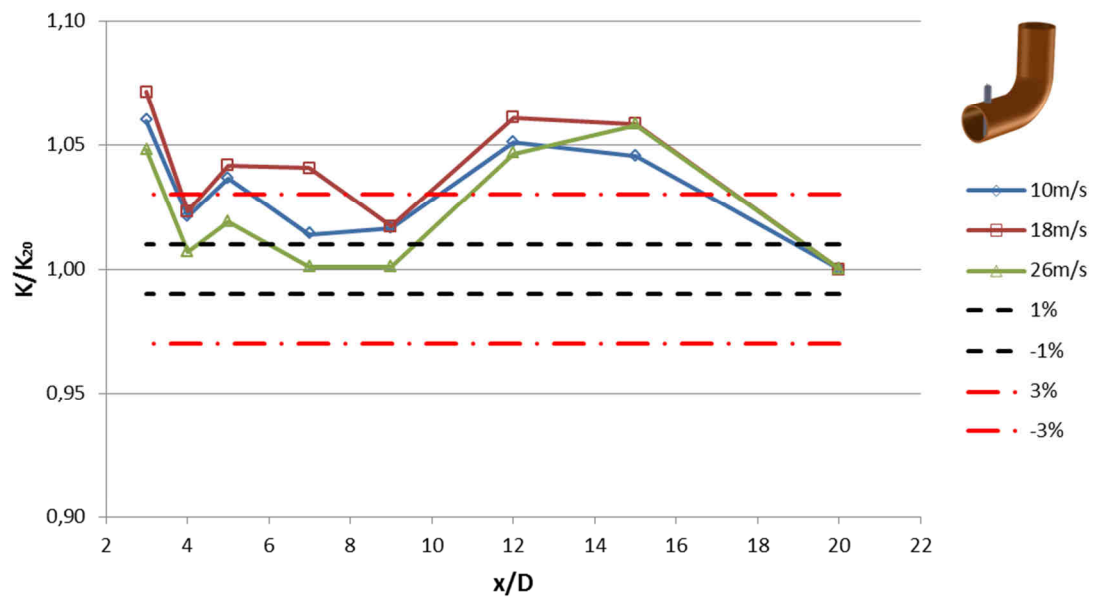
Rys. 36 Współczynniki przepływu K/K_{20} przepływomierza Introbar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy



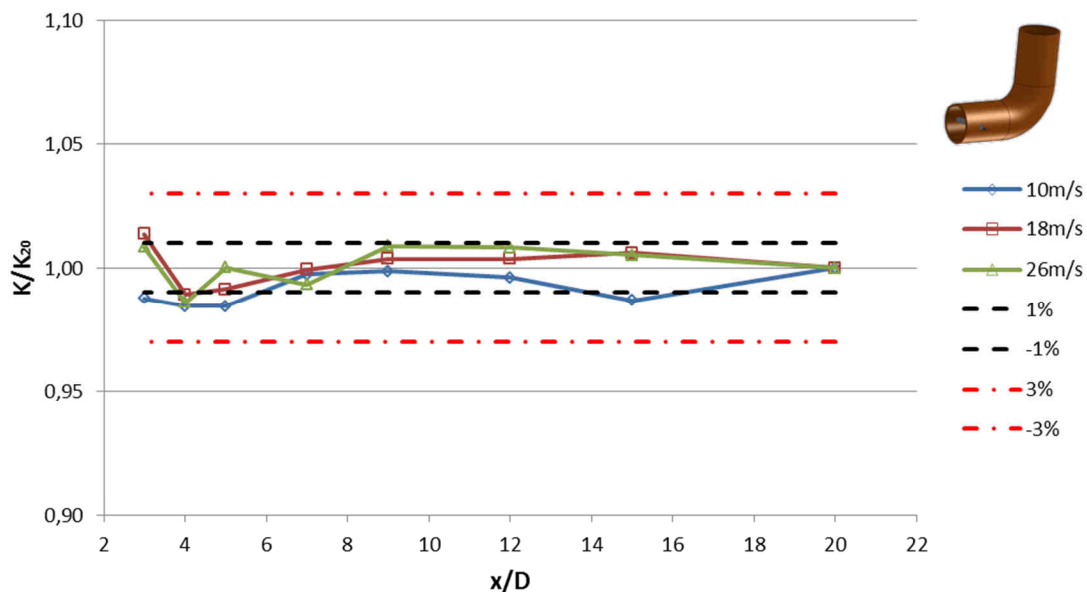
Rys. 37 Współczynniki przepływu K/K_{20} przepływomierza Accubar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy



Rys. 38 Współczynniki przepływu K/K_{20} przepływomierza Accubar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy

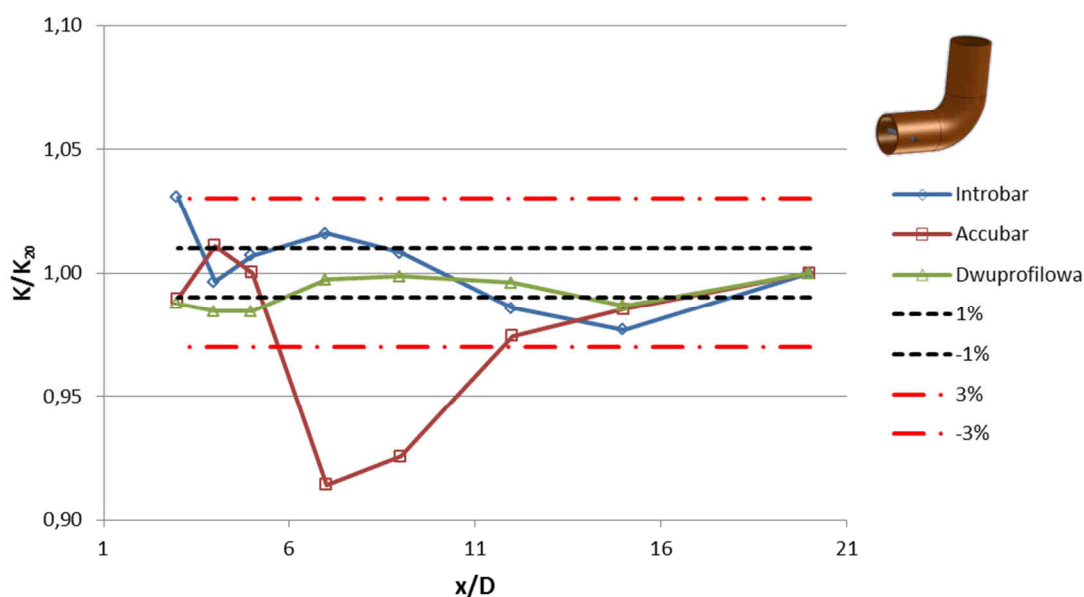


Rys. 39 Współczynniki przepływu K/K_{20} przepływomierza Dwuprofilowego w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy

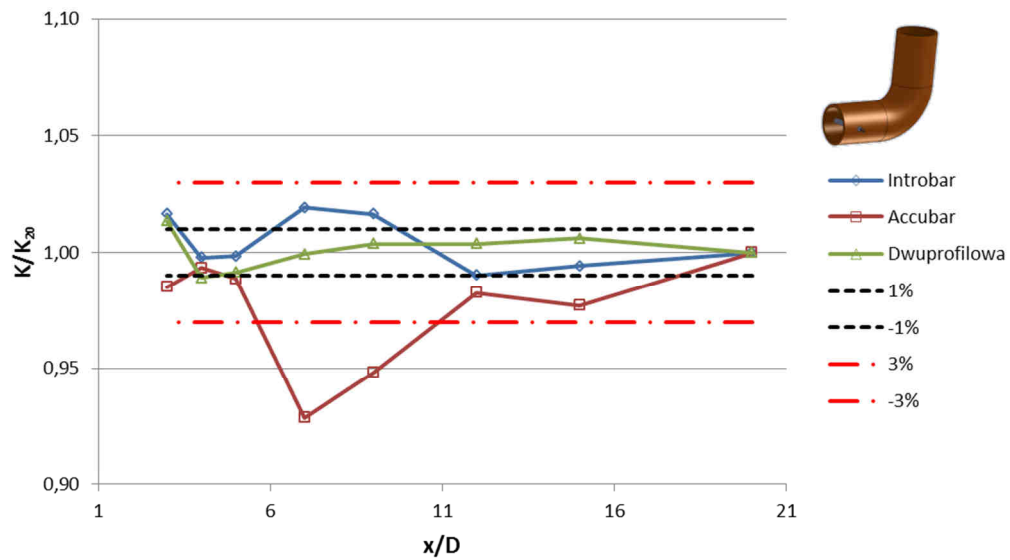


Rys. 40 Współczynniki przepływu K/K_{20} przepływomierza Dwuprofilowego w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy

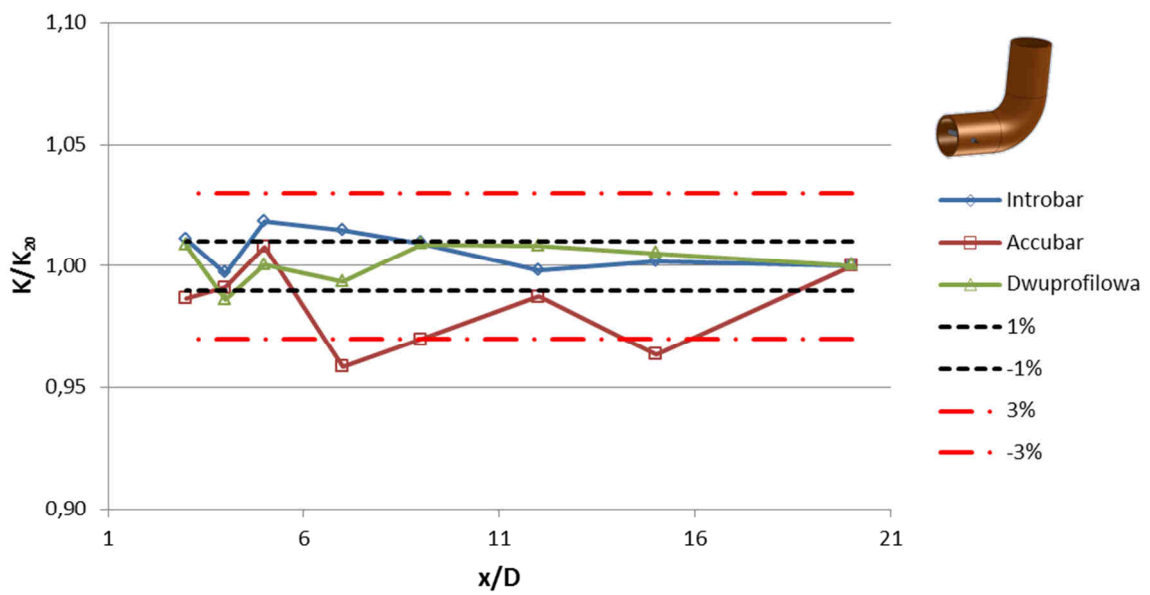
Na rys. 41÷ 46 podano wartości K/K_{20} dla trzech badanych przepływomierzy umieszczonych w płaszczyźnie kolana i prostopadłej do niej dla wszystkich analizowanych prędkości. Zestawienie takie pozwala na porównanie wpływu elementu zaburzającego strugę na współczynnik przepływu analizowanych sond. Analiza poniższych wykresów pozwala na wybór przepływomierza, który jest najmniej wrażliwy na zaburzenie strugi płynu.



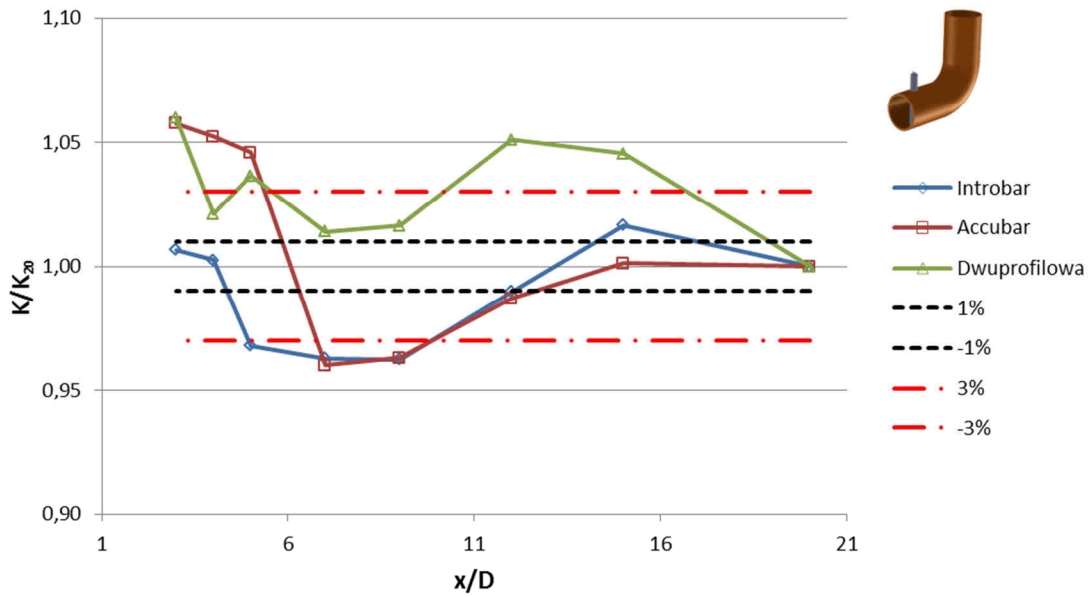
Rys. 41 Współczynniki przepływu K/K_{20} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 10m/s oraz położenia poziomego sondy



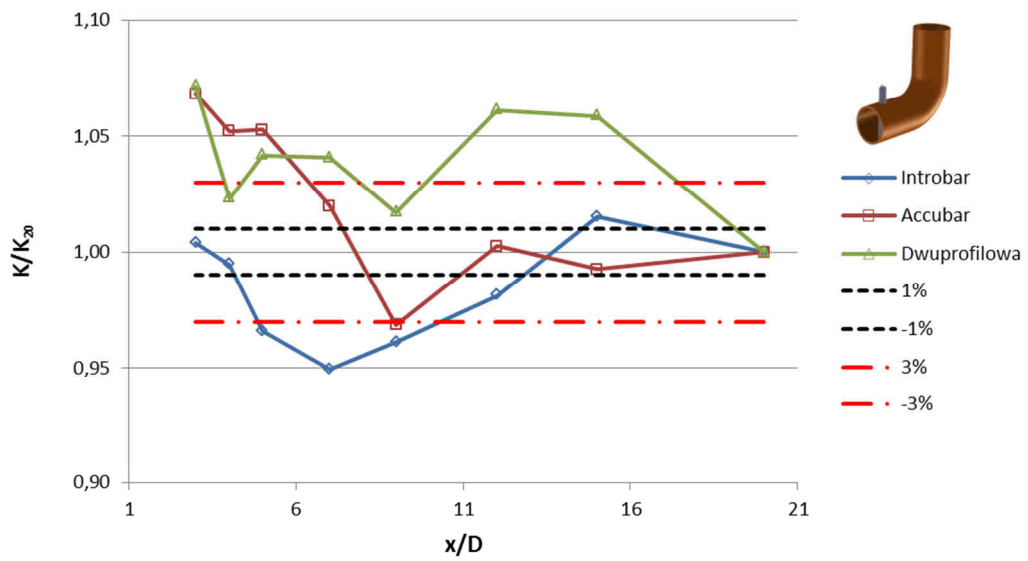
Rys. 42 Współczynniki przepływu K/K_{20} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 18m/s oraz położenia poziomego sondy



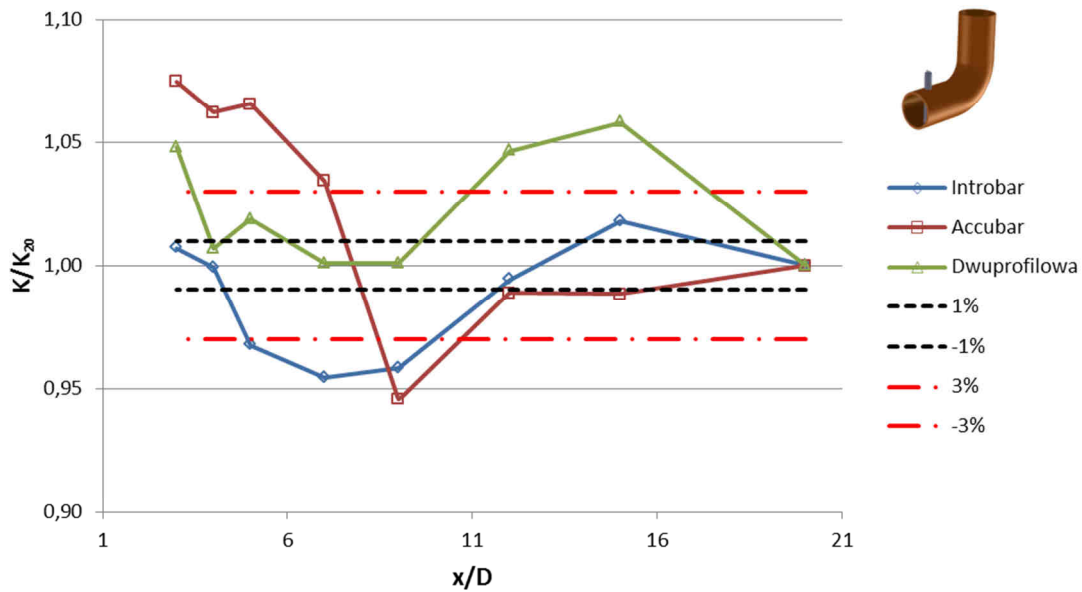
Rys. 43 Współczynniki przepływu K/K_{20} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 26m/s oraz położenia poziomego sondy



Rys. 44 Współczynniki przepływu K/K_{20} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 10m/s oraz położenia pionowego sondy

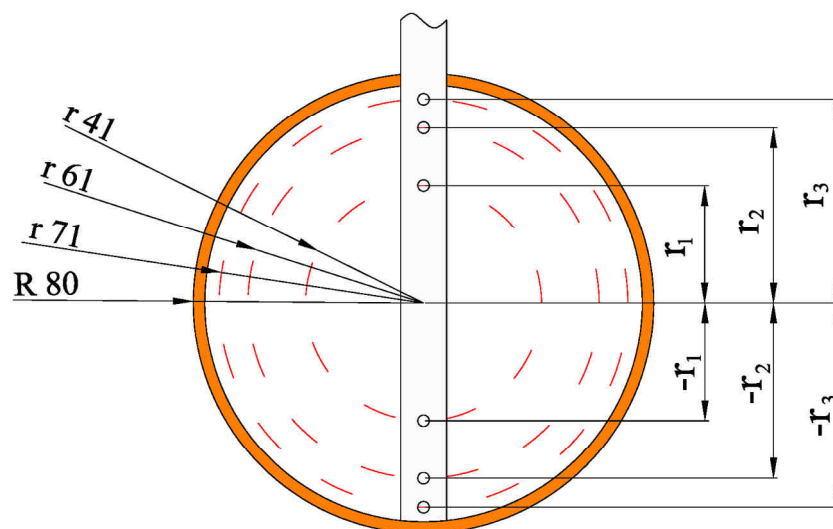


Rys. 45 Współczynniki przepływu K/K_{20} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 18m/s oraz położenia pionowego sondy



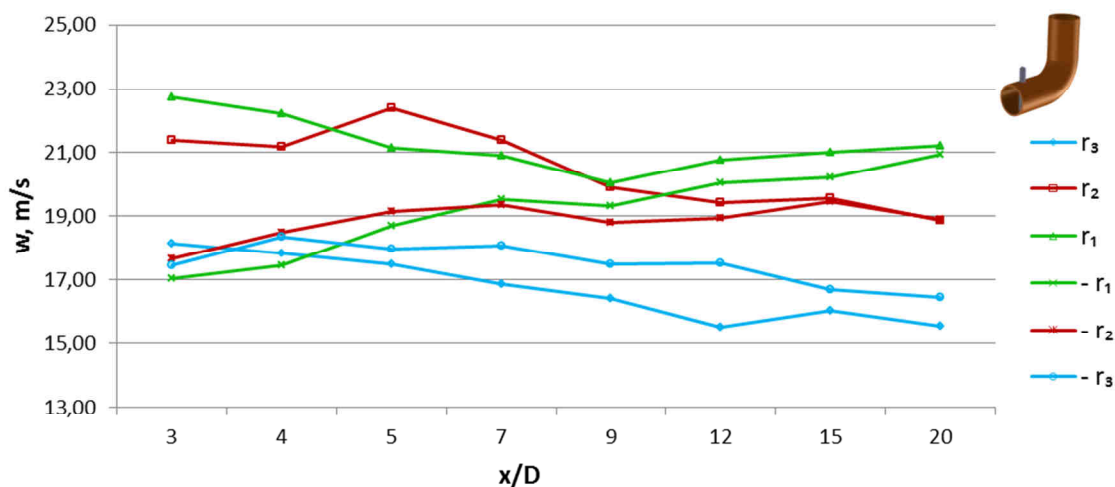
Rys. 46 Współczynniki przepływu K/K_{20} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 26m/s oraz położenia pionowego sondy

Dzięki wyznaczonym profilom prędkości z krokiem 2mm możliwa była analiza prędkości miejscowych, dla położenia odpowiadającym rozmieszczeniu otworków piezometrycznych w badanych konstrukcjach sond piętrzących. Na rys. 47 przedstawiono rozmieszczenie otworków piezometrycznych w badanych konstrukcjach przepływomierzy. We wszystkich analizowanych konstrukcjach sond piętrzących otwory piezometryczne rozmieszczone były zgodnie z zależnością (5) podaną przez Waluś [87].

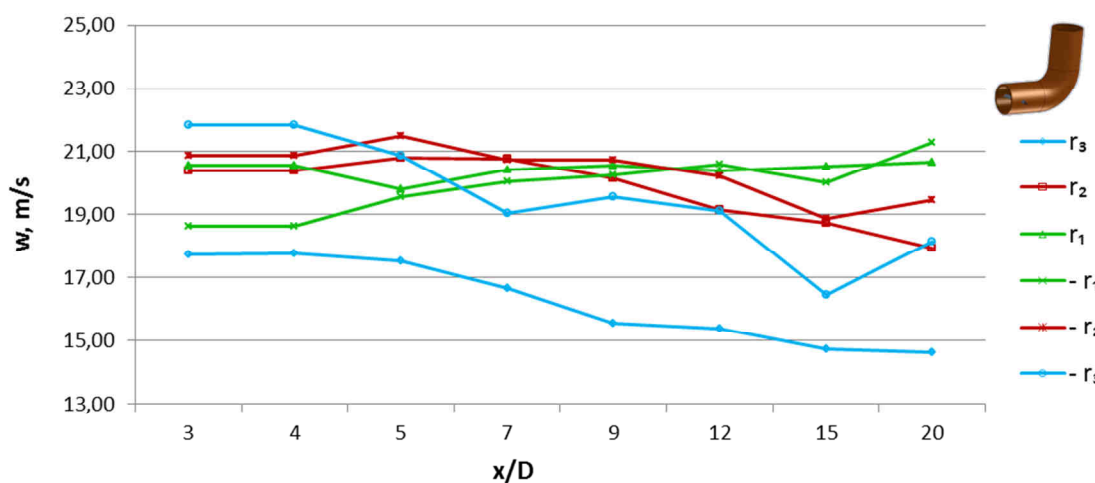


Rys. 47 Rozmieszczenie otworków piezometrycznych w badanych konstrukcjach przepływomierzy

Na rys. 48 ÷ 49 podano wartości prędkości miejscowych w miejscach odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych badanych przepływomierzy umieszczonych w płaszczyźnie kolana oraz płaszczyźnie prostopadłej do niej dla prędkości średniej 18m/s.



Rys. 48 Wartości prędkości miejscowych w lokalizacjach odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych badanych przepływomierzy, dla kolana segmentowego 3x30°, położenie pionowe, prędkość średnia 18m/s



Rys. 49 Wartości prędkości miejscowych w lokalizacjach odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych badanych przepływomierzy, dla kolana segmentowego 3x30°, położenie poziome, prędkość średnia 18m/s

Prędkości lokalne w poszczególnych parach otworków piezometrycznych wraz ze zwiększaniem odległości od elementu zaburzającego przyjmują zbliżone wartości, co świadczy o fakcie iż profil prędkości ulega stabilizacji. Na rys. 49 wartości w skrajnych otworkach piezometrycznych (r_3 oraz $-r_3$) nie zbiegają się. Takie wyniki mogą być spowodowane techniką pomiarową, ponieważ niewielkie zmiany w położeniu sondy

w bliskiej odległości od ścianki rurociągu, gdzie występuje duże gradienty prędkości powodować mogą znaczne rozbieżności wyników pomiarów.

W tabeli 6 zestawiono odchyłki współczynników przepływu $K_{\dot{s}rx/D}$ od $K_{\dot{s}r20}$ analizowanych sond piętrzących w różnych odległościach od elementu zaburzającego. Wartości $K_{\dot{s}rx/D}$ zostały uśrednione dla całego zakresu analizowanych prędkości (10÷30m/s- 93 punkty pomiarowe) a następnie odniesione do współczynnika przepływu wyznaczonego dla położenia, gdzie profil prędkości był w pełni rozwinięty. Dla układu zaburzającego w postaci kolana segmentowego $K_{\dot{s}r20}$ (10÷30m/s- 93 punkty pomiarowe) wyznaczono w odległości $x/D=20$. Zestawienie odchyłek $K_{\dot{s}rx/D}$ od $K_{\dot{s}r20}$ wykonano korzystając z zależności:

$$\delta K_{lok} = \frac{K_{\dot{s}rx/D} - K_{\dot{s}r20}}{K_{\dot{s}r20}} * 100\% \quad (14)$$

Miejsca metrologicznie niekorzystne, dla których niepewność dodatkowa związana z lokalizacją czujnika δK_{lok} jest większe od $\pm 3\%$ w tabeli oznaczono kolorem czerwonym.

Tab. 6 Zestawienie niepewności dodatkowej związanej z lokalizacją czujnika δK_{lok} analizowanych sond piętrzących w różnych odległościach od kolana segmentowego $3 \times 30^\circ$

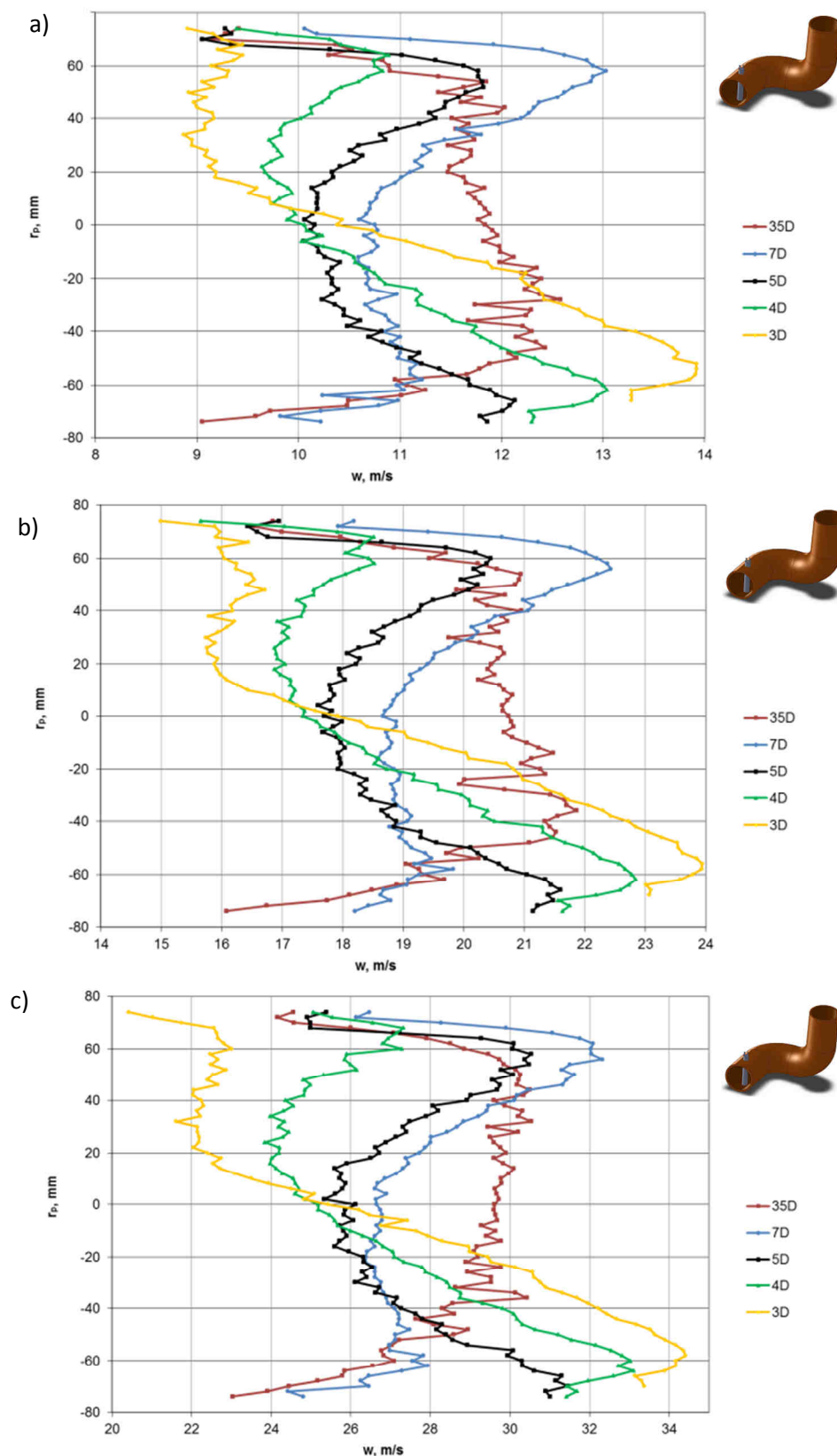
SONDA INTROBAR								
δK_{lok}	3D	4D	5D	7D	9D	12D	15D	20D
Pion	1,1%	-0,3%	-3,0%	-4,5%	-4,1%	-0,5%	1,9%	0,0%
Poziom	2,7%	0,7%	2,3%	3,2%	1,9%	0,6%	0,4%	0,0%
SONDA DWUPROFILOWA								
δK_{lok}	3D	4D	5D	7D	9D	12D	15D	20D
Pion	5,5%	1,1%	2,8%	2,4%	0,7%	5,0%	5,0%	0,0%
Poziom	0,5%	-1,3%	-0,5%	-0,2%	0,5%	0,4%	0,3%	0,0%
SONDA ANNUBAR								
δK_{lok}	3D	4D	5D	7D	9D	12D	15D	20D
Pion	5,5%	5,5%	5,4%	1,8%	-3,2%	-0,1%	-0,7%	0,0%
Poziom	-1,0%	-0,5%	0,0%	-6,0%	-5,2%	-1,4%	-0,6%	0,0%

Przedstawione wyniki pomiarów i obliczeń wskazują, że profil prędkości w bliskim sąsiedztwie za kolaniem segmentowym jest silnie zaburzony, co powoduje odchylenia współczynnika przepływu od wartości K_{20} dla przepływu niezaburzonego. Większy jest zakres tych zmian w przypadku sondy Annubar niż Introbar. Dla wszystkich analizowanych sond zakres tych zmian jest większy w przypadku położenia sond w płaszczyźnie kolana (pionowej), w której zaburzenie profilu jest silnie asymetryczne.

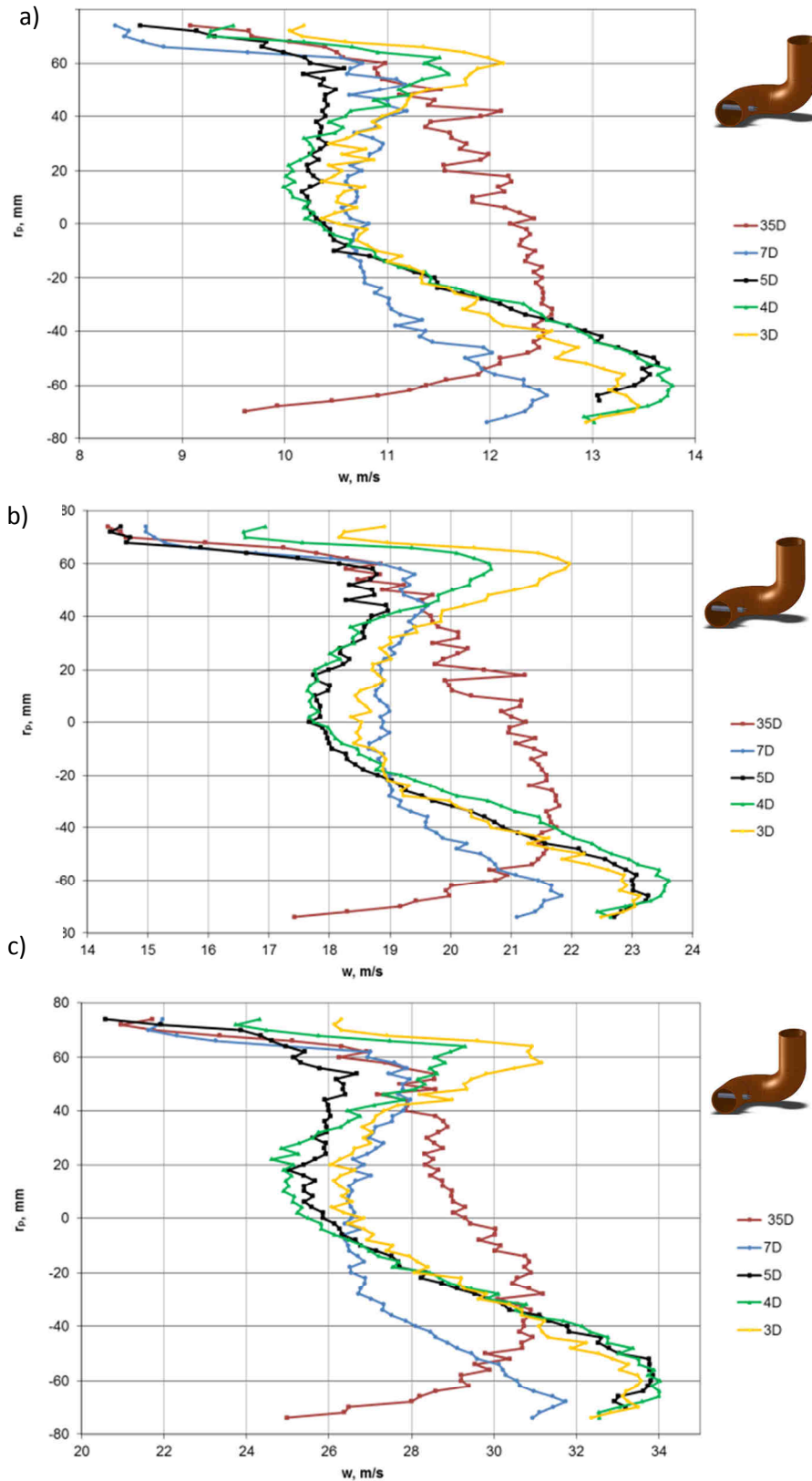
Poziome położenie czujnika jest metrologicznie korzystniejsze. Jest to szczególnie widoczne w przypadku sondy Dwuprofilowej, dla której niepewność dodatkowa δK_{lok} nie przekracza $\pm 2,0\%$. Ta odchyłka na całym badanym odcinku, na którym były instalowane przepływomierze świadczy o tym, że sonda Dwuprofilowa jest mniej wrażliwa na symetryczną deformację profilu prędkości od pozostałych sond. Możliwym wytłumaczeniem jest inne usytuowanie otworów impulsowych po stronie podciśnień. Wpływ może mieć również trójwymiarowy charakter ruchu płynu i oddziaływanie złożonego pola prędkości i ciśnień na sondę. Nie bez znaczenia jest również fakt, że sonda dwuprofilowa stwarza względnie największe opory przepływu. W przypadku rurociągu o średnicy 160mm działanie deprimogeniczne sondy może mieć znaczenie. Zagadnienie to wymaga dalszych badań. Wyniki badań wskazują na niewielką odchyłkę współczynnika K sondy o przekroju kołowym przy umieszczeniu jej w położeniu poziomym w odległości $3\div 5 D$ od kolana. Nie powinno to stanowić zachęty do stosowania sondy o przekroju kołowym w tych warunkach. Nie była wyznaczona wartość K w odległości mniejszej od $3D$ od kolana. Z kolei zmiany K w odległości ponad $4D$ od kolana są znaczne. Widać również wpływ wartości średniej prędkości na wartość K. W przypadku tej sondy stabilizację wartości współczynnika przepływu widać, gdy odległość jej umieszczenia przekroczy 12 średnic rurociągu od kolana. Zagadnieniem wymagającym dodatkowych badań jest również odchyłka od wartości δK_{lok} równej $\pm 5,0\%$ dla odległości 12 oraz $15D$ od kolana dla położenia pionowego sondy Dwuprofilowej.

6.1.2 Wyniki badań analizowanych konstrukcji sond piętrzących w warunkach zaburzonego przepływu układem kolan segmentowych w różnych płaszczyznach

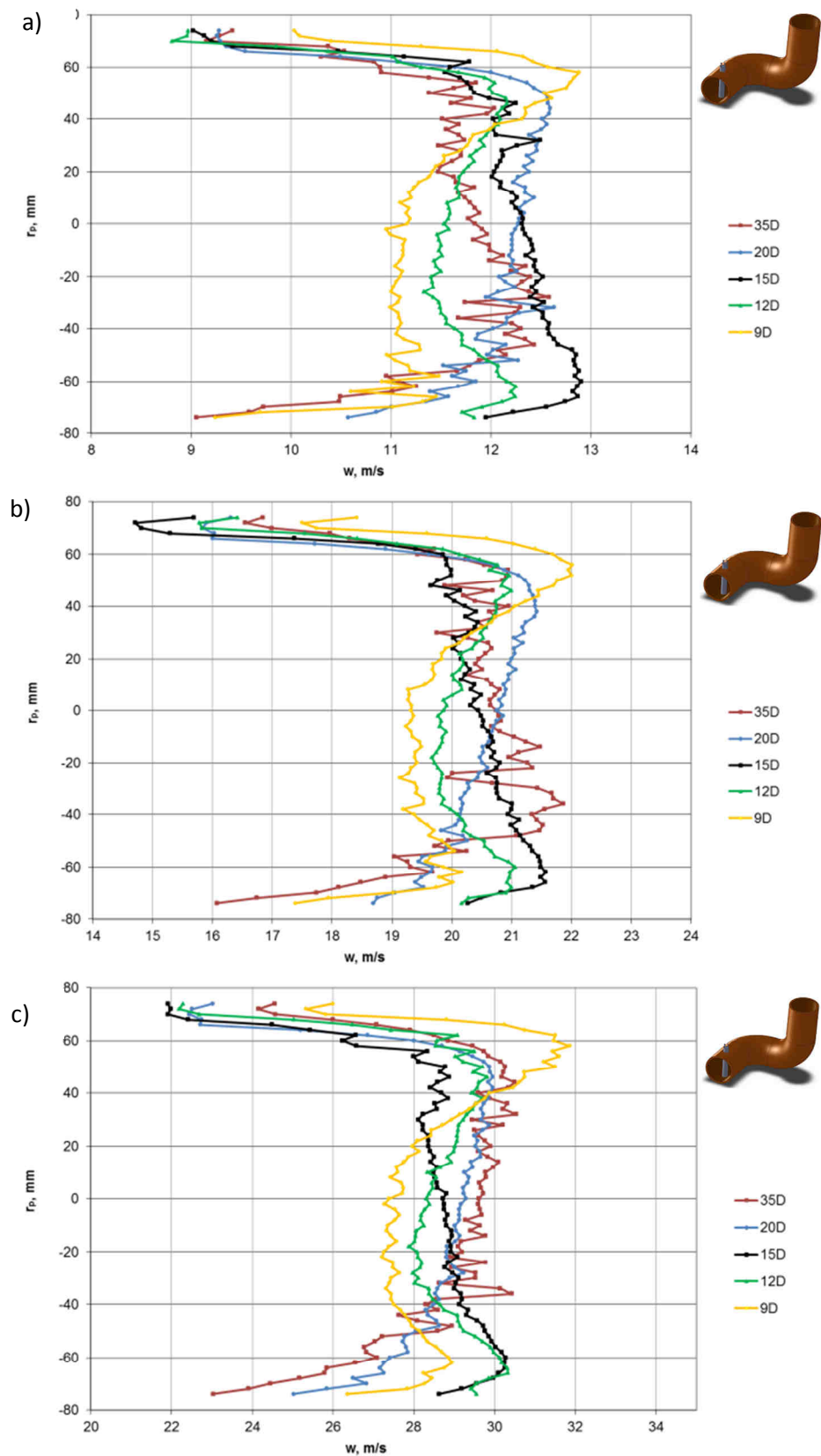
Wyznaczone profile prędkości składają się z 72 punktów pomiarowych. Wartości prędkości lokalnych w punktach pomiarowych przedstawione na wykresach 50÷55 są wynikiem uśredniania 870 pomiarów dla pojedynczego punktu pomiarowego. Profile te wyznaczono dla trzech różnych średnich prędkości przepływu, odpowiednio 10m/s, 18m/s, 26m/s za układem kolan segmentowych w różnych płaszczyznach. Prędkość średnia w trakcie pomiarów ulegała fluktuacji w zakresie: $w_{\text{sr}} = 9,46 \div 10,24$ co odpowiada zmianom liczby Reynoldsa w zakresie $Re = 9,18 \times 10^4 \div 9,94 \times 10^4$, $w_{\text{sr}} = 17,81 \div 18,03$ odpowiednio $Re = 1,73 \times 10^5 \div 1,75 \times 10^5$, $w_{\text{sr}} = 25,46 \div 25,93$ analogicznie $Re = 2,47 \times 10^5 \div 2,52 \times 10^5$. Dla układu zaburzającego w postaci układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach założono odległość od elementu zaburzającego równą 35-ciu średnic rurociągu, jako odległość gdzie profil ulega stabilizacji i jest w pełni rozwinięty. Stosunek $\frac{w_{\text{sr}}}{w_{\text{max}}}$ dla odległości 35-ciu średnic jest zgodny z danymi literaturowymi [34]. Ze względu na silnie asymetryczny profil prędkości przeprowadzono szczegółową analizę wyznaczonych profili prędkości, którą zamieszczono w załączniku nr 2. Układ kolan segmentowych w różnych płaszczyznach jest elementem instalacji, który w znacznym stopniu zaburza profil prędkości. Powstałe zaburzenie ma charakter asymetryczny. W przepływającym płynie powstają wiry, które mogą mieć wpływ na pomiar prędkości lokalnej w kierunku osiowym. Tak duża deformacja profilu prędkości może mieć istotny wpływ na pomiar wszelkiego rodzaju przepływomierzami uśredniającymi ciśnienie dynamiczne. Profile prędkości przedstawione na rys. 51,53 oraz 55 są wynikiem badań zrealizowanych podczas ustawienia poziomego układu pomiarowego. Profil prędkości we względnej odległości 22 średnic od elementu zaburzającego jest bliski profilowi który przyjęto jako w pełni rozwinięty. Dla położenia pionowego układu pomiarowego profil prędkości jest znacznie bardziej zdeformowany co nie powinno stanowić zachęty do lokalizacji przepływomierzy uśredniających ciśnienie dynamiczne w odległości mniejszej od 30 średnic od elementu zaburzającego, gdzie profil ulega stabilizacji, jest bliski profilowi który przyjęto jako w pełni rozwinięty.



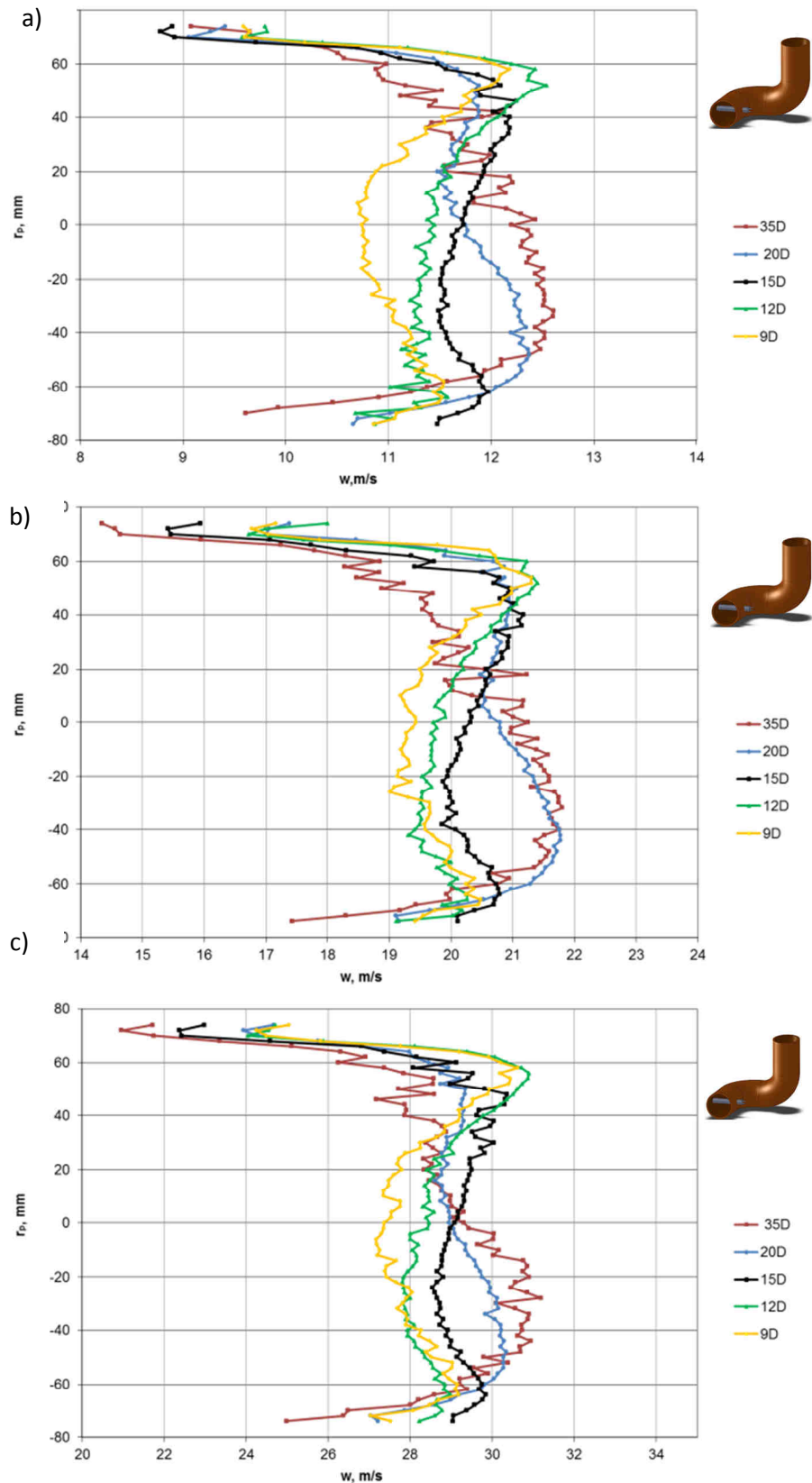
Rys. 50 Profile prędkości w odległościach 3D, 4D, 5D, 7D, 35D od elementu zaburzającego w postaci układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach, położenie pionowe sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a) 10,00 m/s, b) 18,00 m/s, c) 26,00 m/s



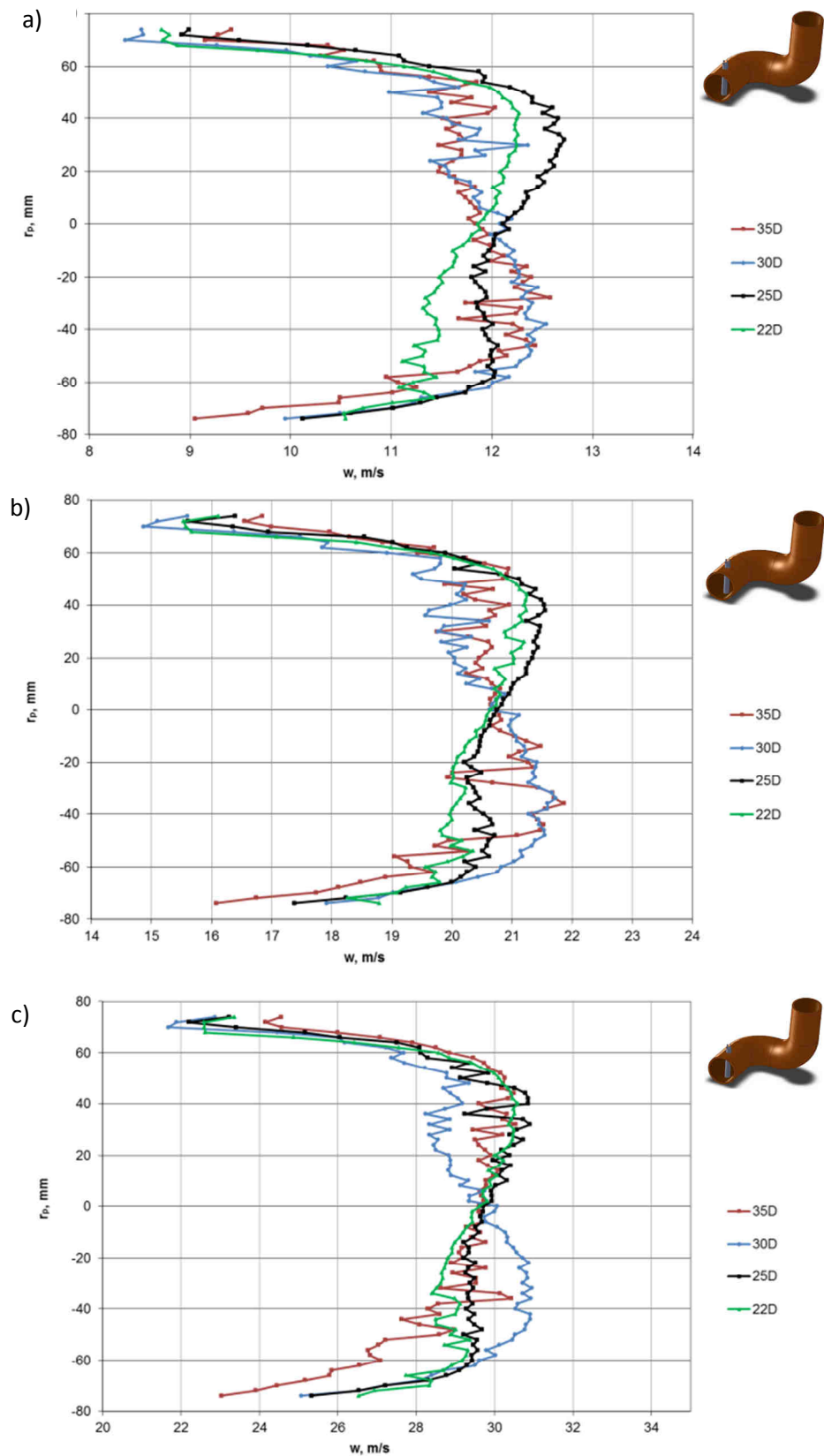
Rys. 51 Profile prędkości w odległościach 3D, 4D, 5D, 7D, 35D od elementu zaburzającego w postaci układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach, położenie poziome sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a) 10,00 m/s, b) 18,00 m/s, c) 26,00 m/s



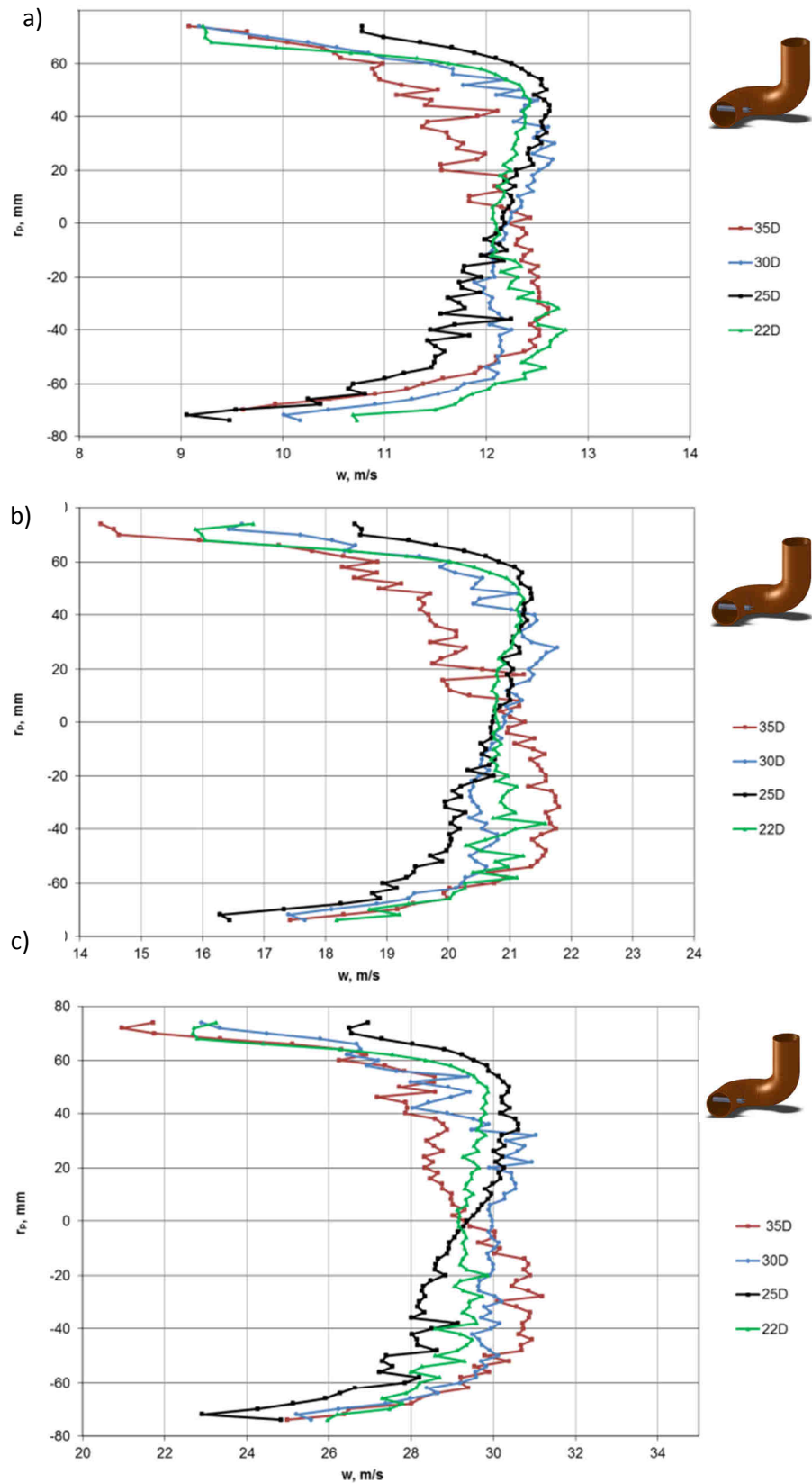
Rys. 52 Profile prędkości w odległościach 9D, 12D, 15D, 20D, 35D od elementu zaburzającego w postaci układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach, położenie pionowe sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a) 10,00 m/s, b) 18,00 m/s, c) 26,00 m/s



Rys. 53 Profile prędkości w odległościach 9D, 12D, 15D, 20D, 35D od elementu zaburzającego w postaci układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach, położenie poziome sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a) 10,00 m/s, b) 18,00 m/s, c) 26,00 m/s

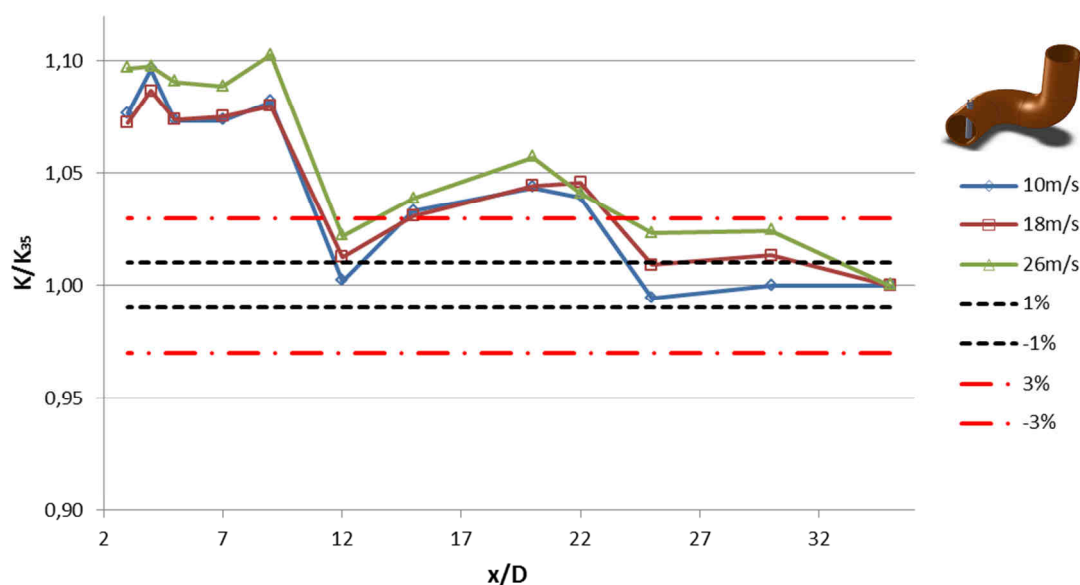


Rys. 54 Profile prędkości w odległościach 22D, 25D, 30D, 35D od elementu zaburzającego w postaci układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach, położenie pionowe sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a)10,00m/s, b)18,00m/s, c)26,00m/s

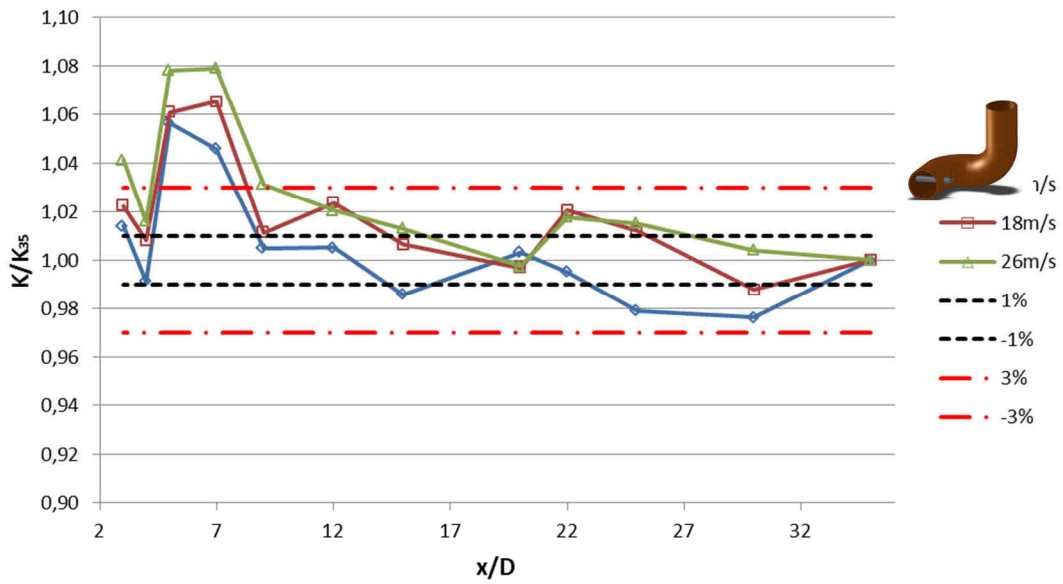


Rys. 55 Profile prędkości w odległościach 22D, 25D, 30D, 35D od elementu zaburzającego w postaci układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach, położenie poziome sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a)10,00m/s, b)18,00m/s, c)26,00m/s

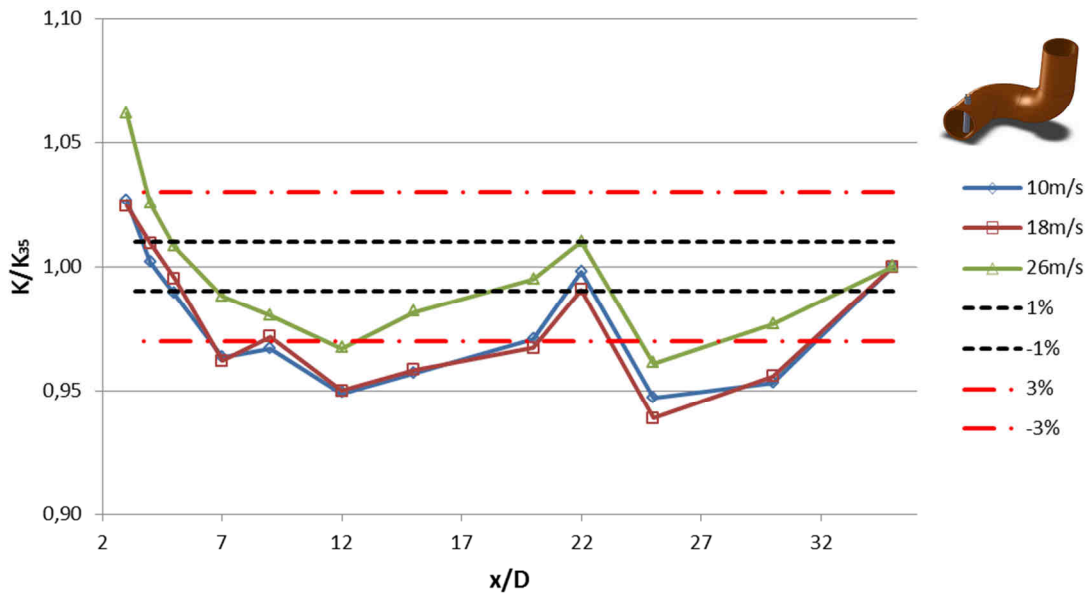
Wpływ zaburzenia strugi na wskazania przepływomierza analizowano wyznaczając współczynnik przepływu K dla danej lokalizacji przepływomierza i odnosząc jego wartość do wartości K_{35} , czyli wartości tego współczynnika w odległości 35 średnic rurociągu od układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach, gdzie przyjęto, że profil prędkości jest w pełni rozwinięty. Na rys. 56÷61 podano wartości K/K_{35} dla trzech badanych przepływomierzy umieszczonych w różnych płaszczyznach i odległościach od elementu zaburzającego dla wszystkich analizowanych prędkości. W załączniku nr 4 zamieszczono dane pomiarowe wartości współczynnika przepływu K w funkcji prędkości dla wszystkich analizowanych konstrukcji sond piętrzących, dla układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach. Jak można zauważyć na poniższych wykresach zmiana prędkości przepływającego medium nie wpływa znacząco na wartość współczynnika K dla przepływomierza Dwuprofilowego. Pozostałe analizowane rozwiązania konstrukcyjne przepływomierzy wykazują zmiany wartości współczynnika przepływu w zależności od prędkości przepływającego medium w skrajnie niekorzystnych położeniach przekraczające $\pm 9,0\%$.



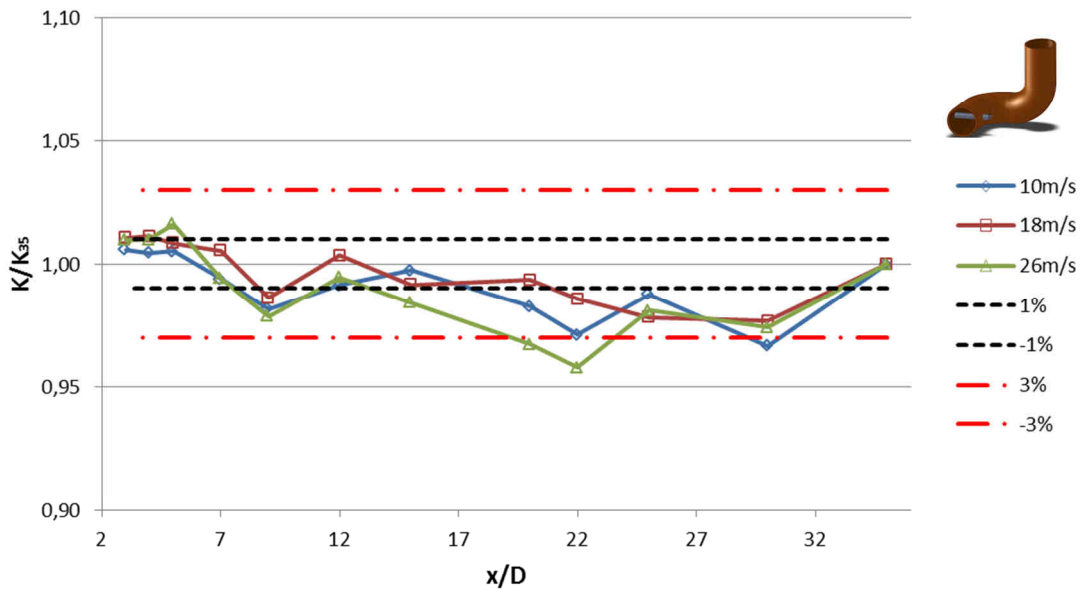
Rys. 56 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Introbar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy



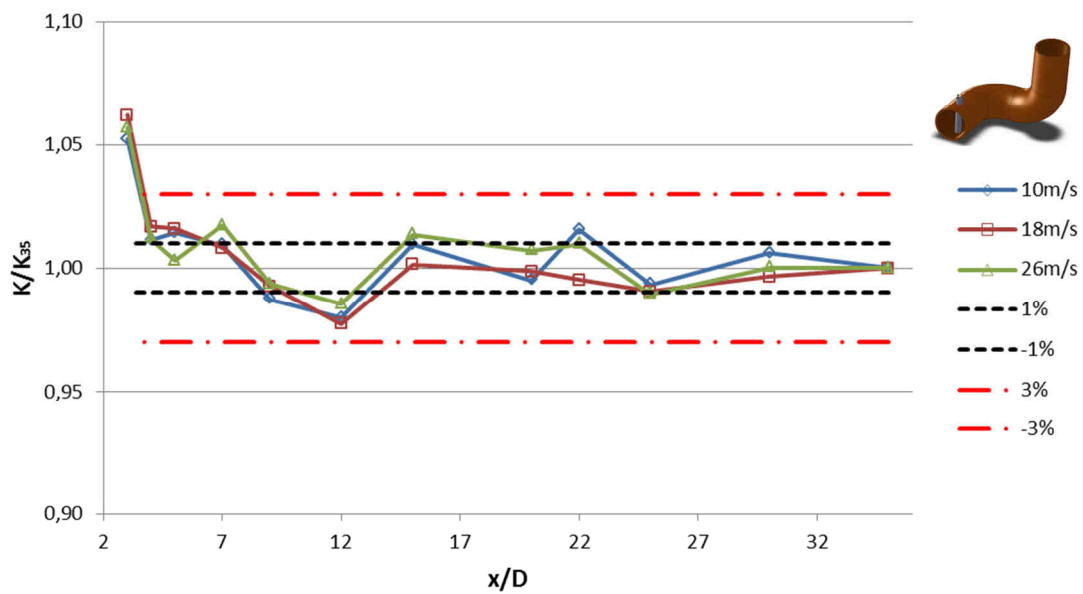
Rys. 57 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Introbar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy



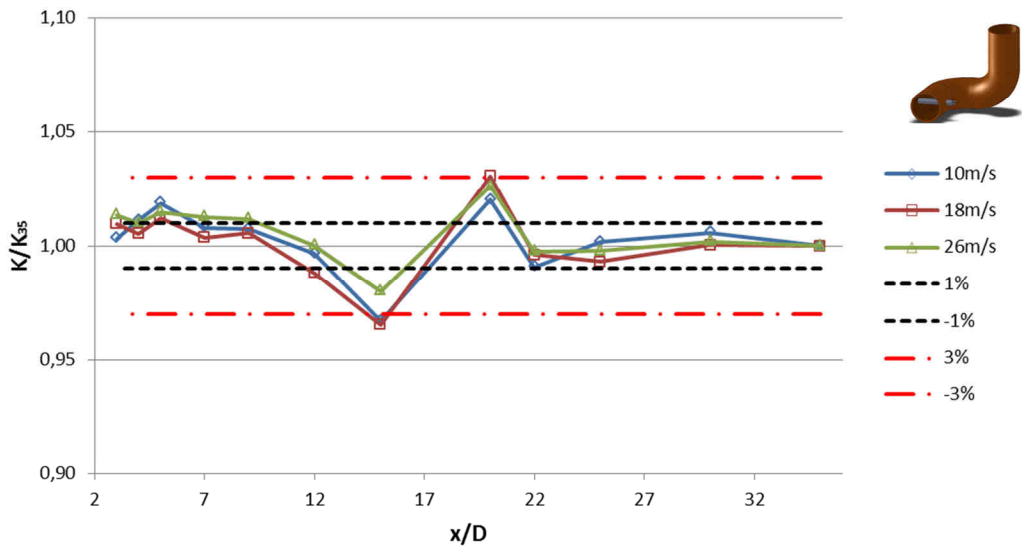
Rys. 58 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Accubar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy



Rys. 59 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Accubar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy

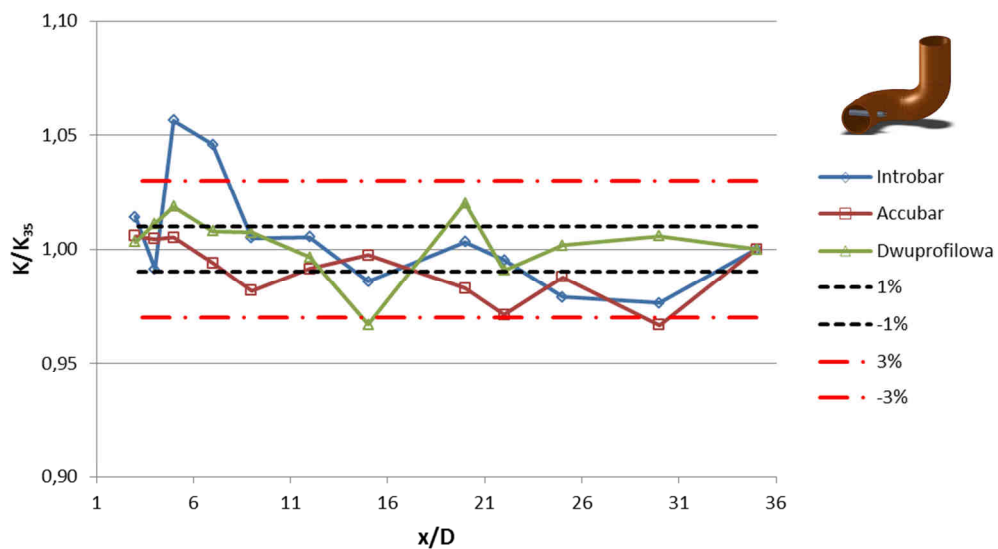


Rys. 60 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Dwuprofilowego w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy

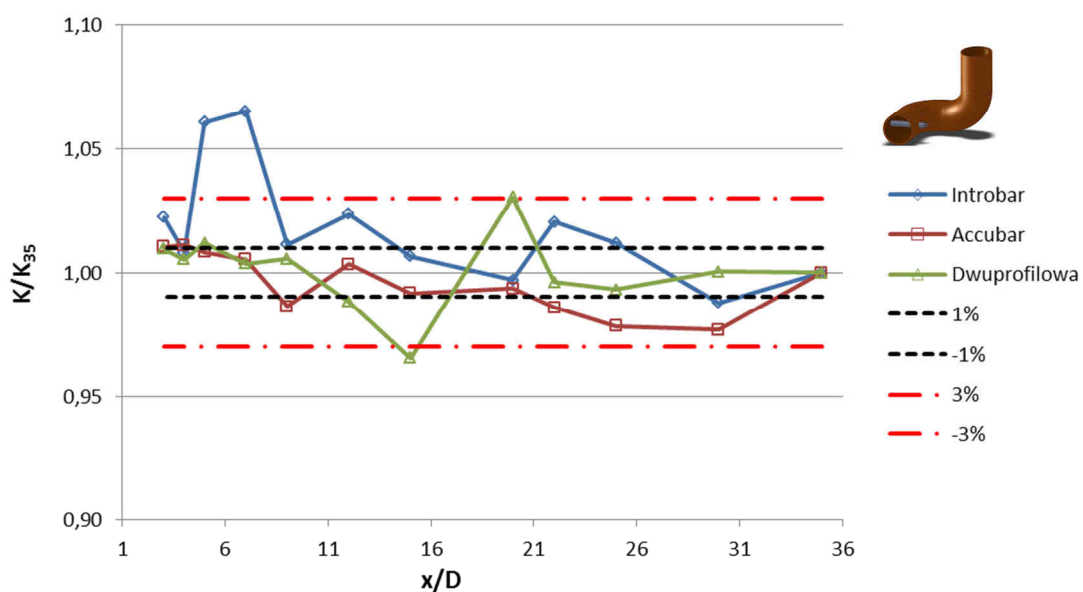


Rys. 61 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływowierza Dwuprofilowego w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy

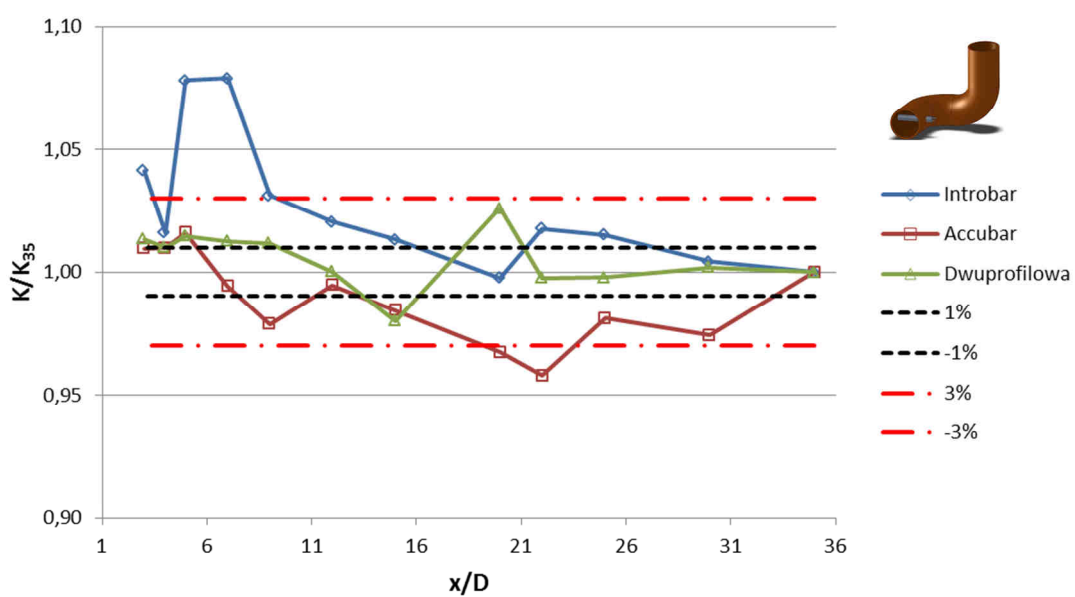
Na rys. 62 ÷ 67 zestawiono graficznie wartości K/K_{35} dla trzech badanych przepływowierzy umieszczonych w dwóch różnych płaszczyznach względem układu kolan segmentowych ustawionych w różnych płaszczyznach dla wszystkich analizowanych prędkości. Zestawienie takie pozwala na porównanie wpływu elementu zaburzającego strugę na współczynnik przepływu analizowanych sond. Analiza poniższych wykresów pozwala na wybór przepływowierza, który jest najmniej wrażliwy na zaburzenie strugi płynu w konkretnym położeniu. Wpływ zaburzenia strugi na wskazania przepływowierza analizowano ustalając współczynnik przepływu K dla danej lokalizacji przepływowierza do wartości K_{35} , gdzie przyjęto, że profil prędkości jest w pełni rozwinięty.



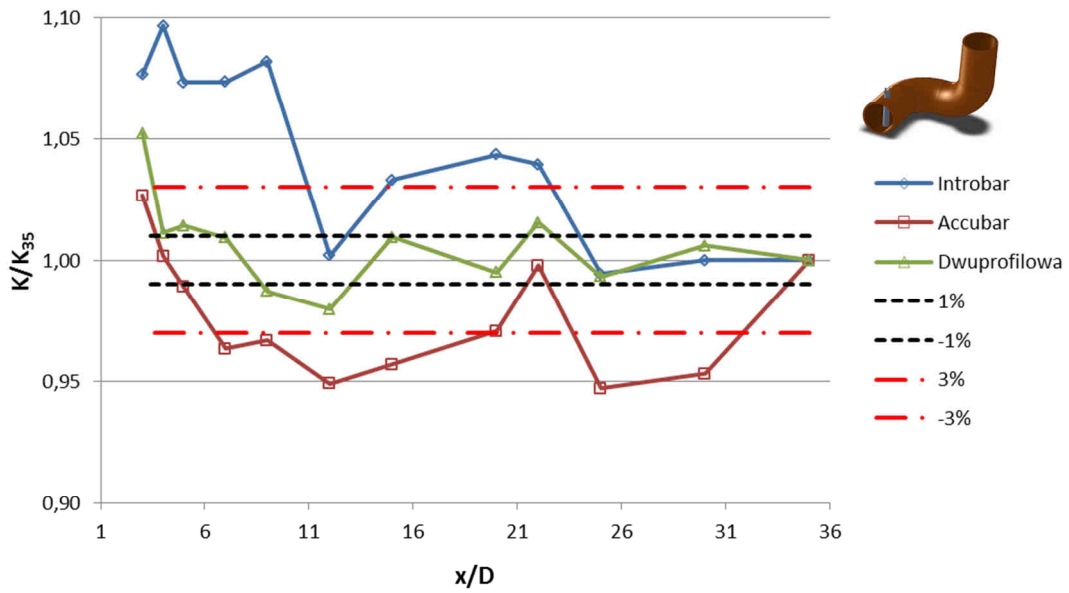
Rys. 62 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływowierzy, przy prędkości średniej 10m/s oraz położenia poziomego sondy



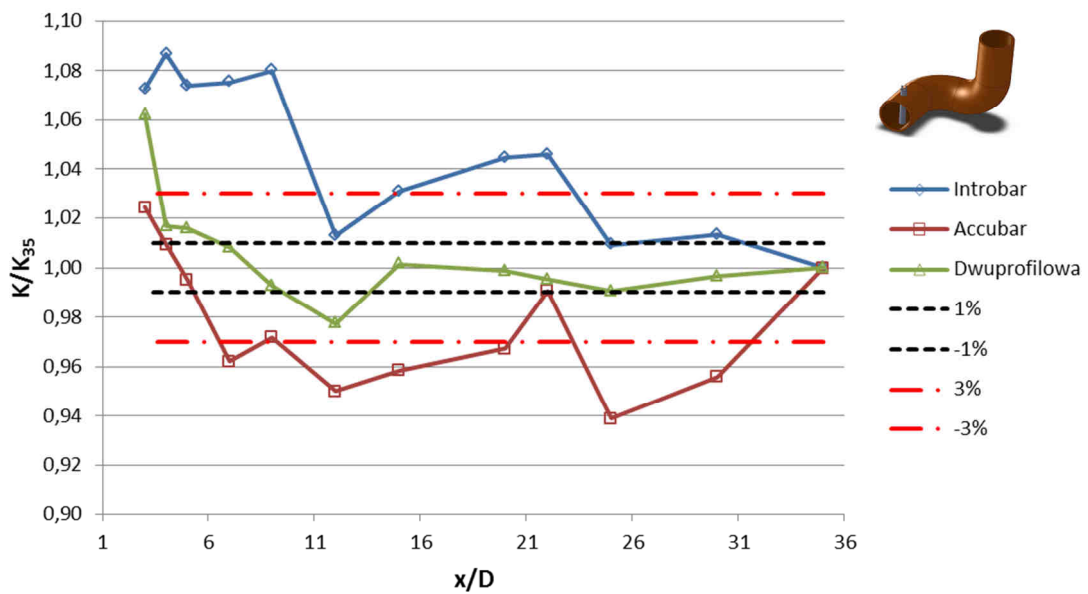
Rys. 63 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 18m/s oraz położenia poziomego sondy



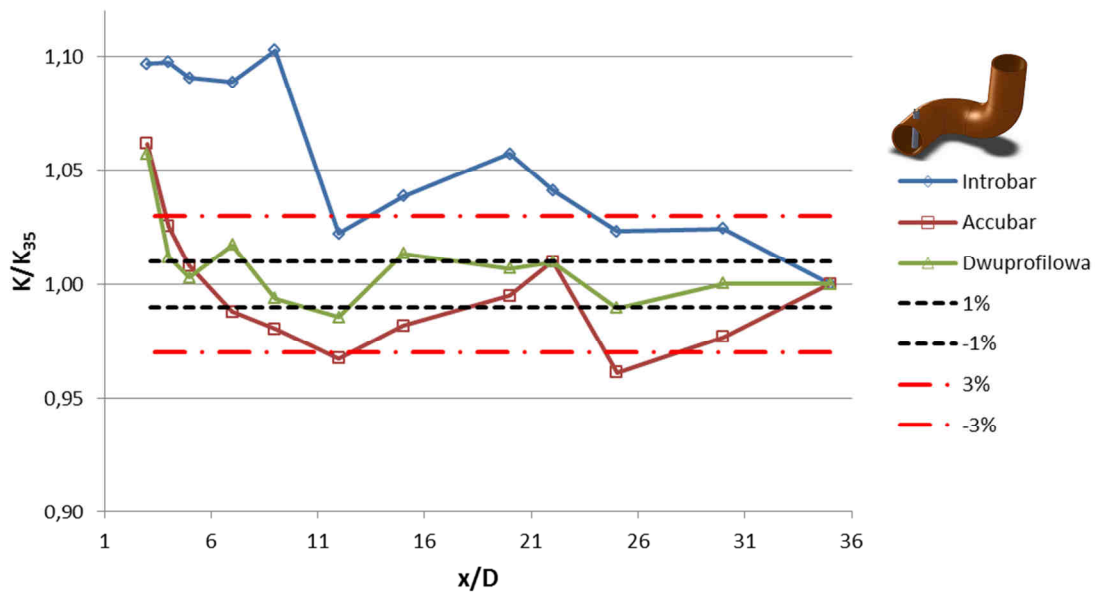
Rys. 64 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 26m/s oraz położenia poziomego sondy



Rys. 65 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 10m/s oraz położenia pionowego sondy

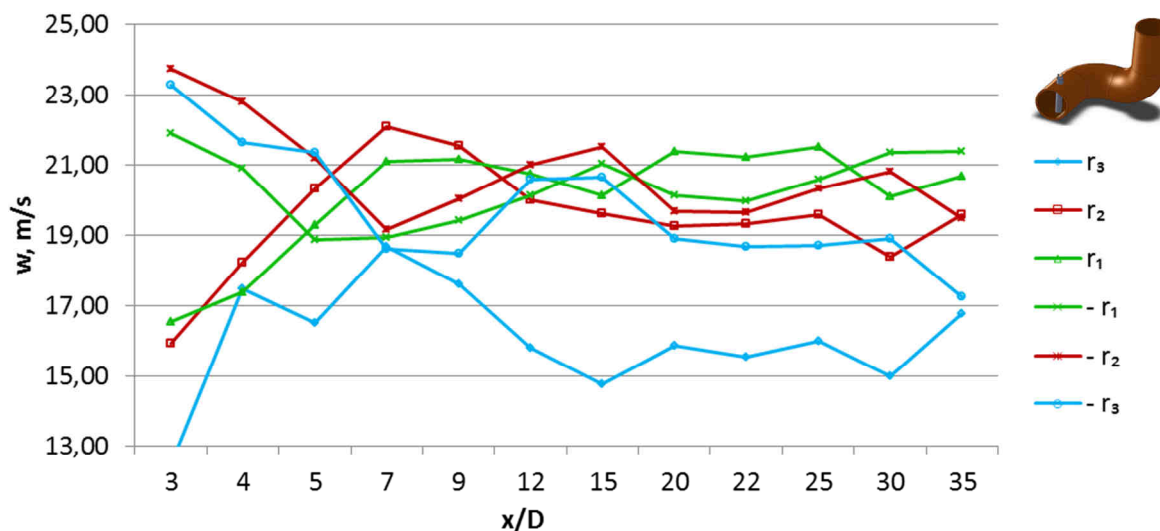


Rys. 66 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 18m/s oraz położenia pionowego sondy

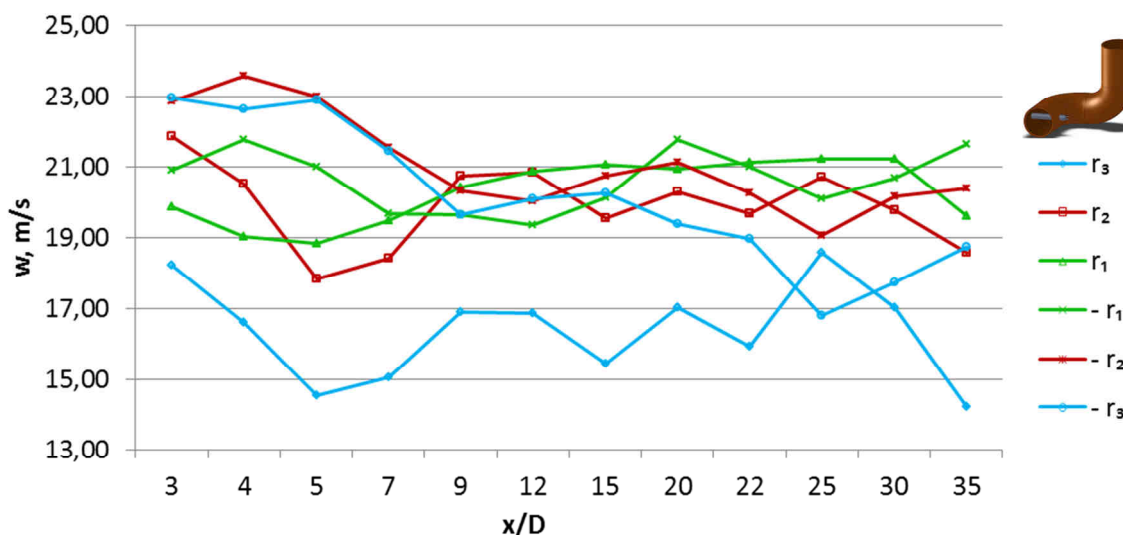


Rys. 67 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 26m/s oraz położenia pionowego sondy

Dzięki wyznaczonym profilom prędkości z krokiem 2mm możliwa była analiza prędkości miejscowych, dla położenia odpowiadającym rozmieszczeniu otworków piezometrycznych w badanych konstrukcjach sond piętujących. Na rys. 47 przedstawiono rozmieszczenie otworków piezometrycznych w badanych konstrukcjach przepływomierzy. Na rys. 68 ÷ 69 podano wartości prędkości miejscowych w lokalizacjach odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych badanych przepływomierzy. Sondy umieszczano w pionie oraz poziomie w stosunku do drugiego od strony napływu kolana, dla układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach przy prędkości średniej 18m/s. Prędkości lokalne w poszczególnych parach otworków piezometrycznych wraz ze zwiększaniem odległości od elementu zaburzającego przyjmują zbliżone wartości, co świadczy o fakcie iż profil prędkości ulega stabilizacji. Na rys. 69 wartości w skrajnych otworkach piezometrycznych (r_3 oraz $-r_3$) nie zbiegają się. Takie wyniki mogą być spowodowane przyjętą techniką pomiarową, ponieważ niewielkie zmiany w położeniu sondy w bliskiej odległości od ścianki rurociągu, gdzie występuje duże gradienty prędkości mogą być powodem znacznych rozbieżności wyników pomiarów prędkości lokalnych.



Rys. 68 Wartości prędkości miejscowych w lokalizacjach odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych badanych przepływomierzy, dla układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach, położenie pionowe, prędkość średnia 18m/s



Rys. 69 Wartości prędkości miejscowych w lokalizacjach odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych badanych przepływomierzy, dla układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach, położenie poziome, prędkość średnia 18m/s

W tabeli 7 zestawiono odchyłki współczynników przepływu $K_{\dot{v}rx/D}$ od $K_{\dot{v}r35}$ analizowanych sond piętrzących w różnych odległościach od elementu zaburzającego. Wartości $K_{\dot{v}rx/D}$ zostały uśrednione dla całego zakresu analizowanych prędkości (10÷30m/s- 93 punkty pomiarowe) a następnie odniesione do współczynnika przepływu wyznaczonego dla położenia, gdzie profil prędkości był w pełni rozwinięty. Dla układu zaburzającego w postaci układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach $K_{\dot{v}r35}$ (10÷30m/s- 93 punkty pomiarowe)

wyznaczono w odległości $x/D=35$. Zestawienie odchyłek $K_{\dot{s}rx/D}$ od $K_{\dot{s}r35}$ wykonano korzystając z zależności:

$$\delta K_{lok} = \frac{K_{\dot{s}rx/D} - K_{\dot{s}r35}}{K_{\dot{s}r35}} * 100\% \quad (15)$$

Miejsca metrologicznie niekorzystne, dla których niepewność dodatkowa związana z lokalizacją czujnika δK_{lok} jest większe od $\pm 3\%$ w tabeli oznaczono kolorem czerwonym.

Tab. 7 Zestawienie niepewności dodatkowej związanej z lokalizacją czujnika δK_{lok} analizowanych sond piętrzących w różnych odległościach od układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach

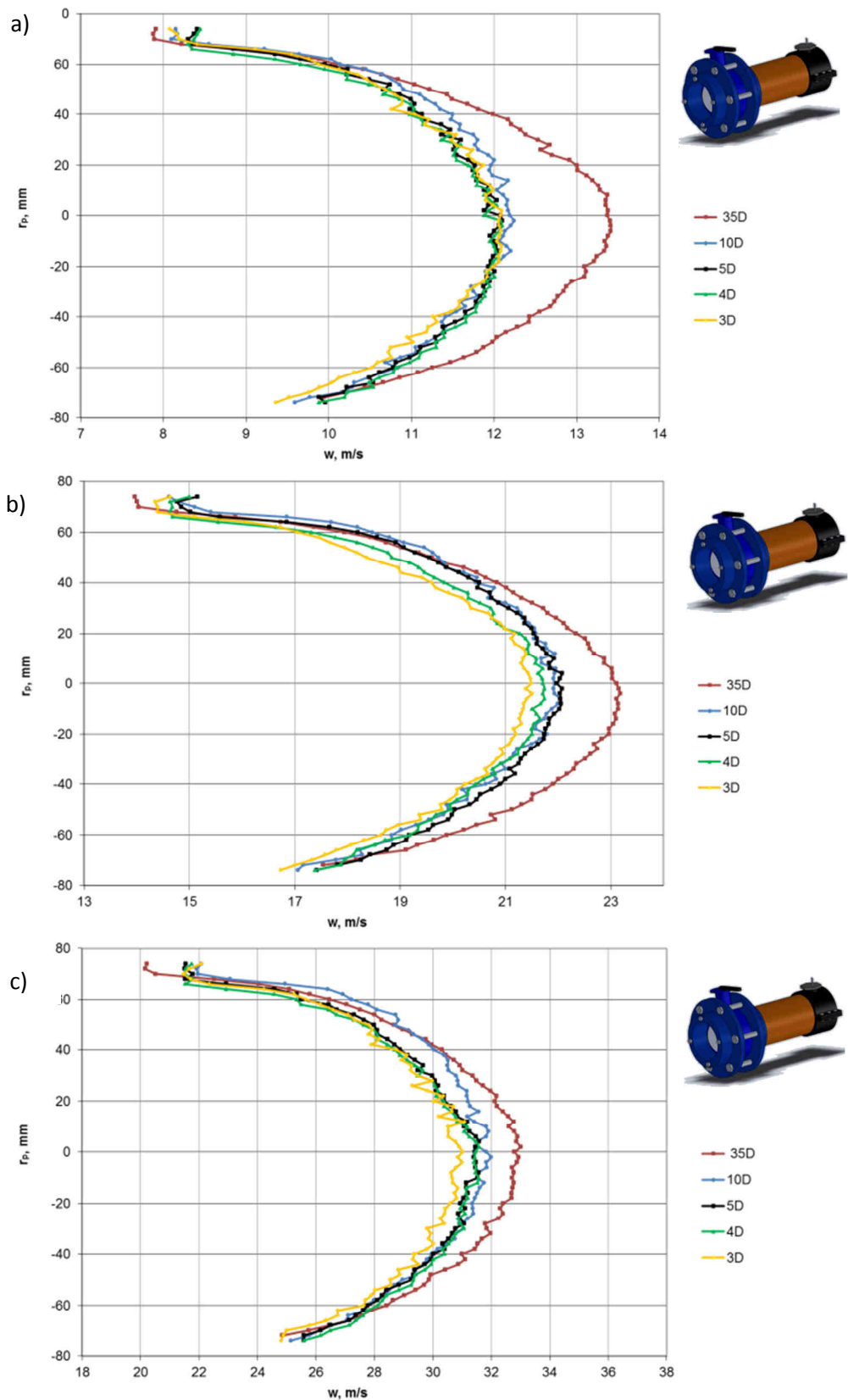
SONDA INTROBAR												
δK_{lok}	3D	4D	5D	7D	9D	12D	15D	20D	22D	25D	30D	35D
Pion	8,3%	9,1%	8,3%	7,8%	9,1%	1,4%	3,1%	4,4%	4,7%	1,3%	1,1%	0,0%
Poziom	1,9%	1,1%	7,2%	7,3%	2,5%	2,3%	1,1%	0,4%	1,4%	1,5%	-0,7%	0,0%
SONDA DWUPROFILOWA												
δK_{lok}	3D	4D	5D	7D	9D	12D	15D	20D	22D	25D	30D	35D
Pion	3,1%	1,7%	1,0%	1,3%	-0,6%	-1,5%	1,2%	0,2%	1,1%	-0,5%	0,4%	0,0%
Poziom	0,9%	0,7%	1,3%	0,9%	0,7%	-0,6%	-2,7%	2,4%	-0,8%	-0,6%	0,2%	0,0%
SONDA OPLYWOWA ANNUBAR												
δK_{lok}	3D	4D	5D	7D	9D	12D	15D	20D	22D	25D	30D	35D
Pion	4,7%	2,3%	0,5%	-2,3%	-2,0%	-3,7%	-2,5%	-1,9%	1,0%	-4,2%	-3,3%	0,0%
Poziom	1,1%	1,0%	1,4%	-0,3%	-1,7%	-0,2%	-1,2%	-2,0%	-3,6%	-1,8%	-2,7%	0,0%

Przedstawione wyniki pomiarów i obliczeń wskazują, że profil prędkości w bliskim sąsiedztwie za układem kolan segmentowych jest silnie zaburzony, co powoduje odchylenia współczynnika przepływu od wartości K_{35} dla przepływu niezaburzonego. Większy jest zakres tych zmian w przypadku sondy Annubar oraz Introbar aniżeli sondy Dwuprofilowej. Zakres tych zmian jest większy w przypadku położenia sond w pionie względem drugiego kolana, w której to zaburzenie profilu jest silnie asymetryczne. Poziome położenie czujnika jest metrologicznie korzystniejsze. Szczególnie jest to widoczne w przypadku sondy Dwuprofilowej, dla której odchyłka niepewności dodatkowej δK_{lok} nie przekracza $\pm 3,0\%$. Ta odchyłka na całym badanym odcinku, na którym były instalowane przepływomierze świadczy o tym, że sonda Dwuprofilowa jest mniej wrażliwa na niesymetryczną deformację profilu prędkości od pozostałych sond. Zagadnienie to wymaga dalszych badań. Wyniki badań wskazują na niewielką odchyłkę współczynnika K sondy o przekroju kołowym przy umieszczeniu jej w położeniu poziomym względem drugiego kolana w odległości 22D od układu kolan segmentowych. Wskazuje to na możliwość stosowania sondy o przekroju

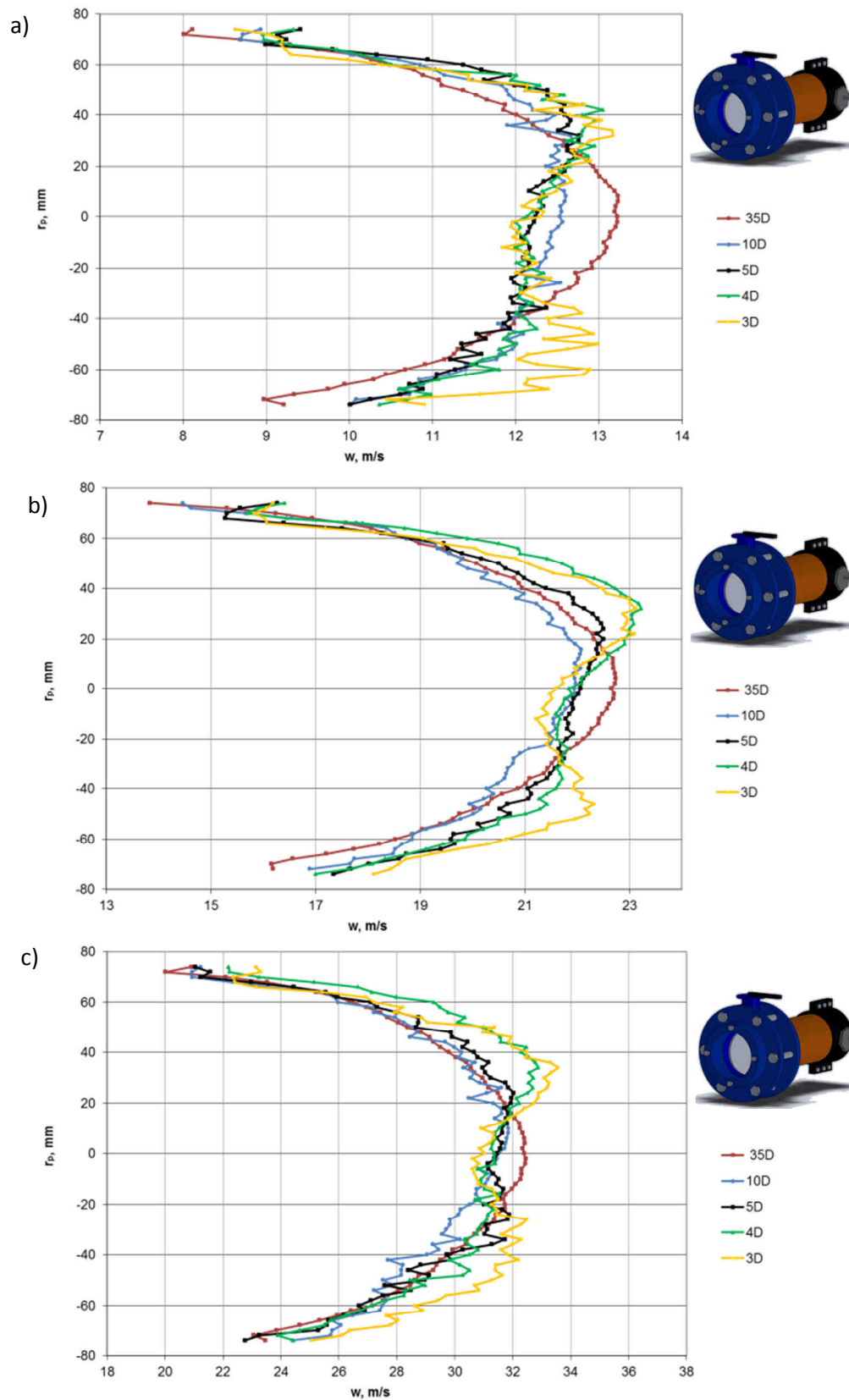
kołowym w tych warunkach. Sonda Introbar z kolei dla położenia pionowego w odległościach $3 \div 9D$ wykazuje odchyłkę niepewności dodatkowej δK_{lok} przekraczającą $\pm 9,0\%$ co nie powinno stanowić zachęty do jej stosowania w takim położeniu. Zauważalny jest również wpływ wartości średniej prędkości na wartość współczynnika K . Dla układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach spośród analizowanych kształtów, najlepsze wyniki metrologiczne daje sonda Dwuprofilowa. Zagadnieniem wymagającym dodatkowych badań jest również odchyłka niepewności dodatkowej $\delta K_{lok} \pm 4,0\%$ dla odległości $x/D=25$ od układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach dla pionowego położenia sondy Annubar względem układu odniesienia.

6.1.3 Wyniki badań analizowanych konstrukcji sond piętujących w warunkach zaburzonego przepływu przepustnicą w pełni otwartą

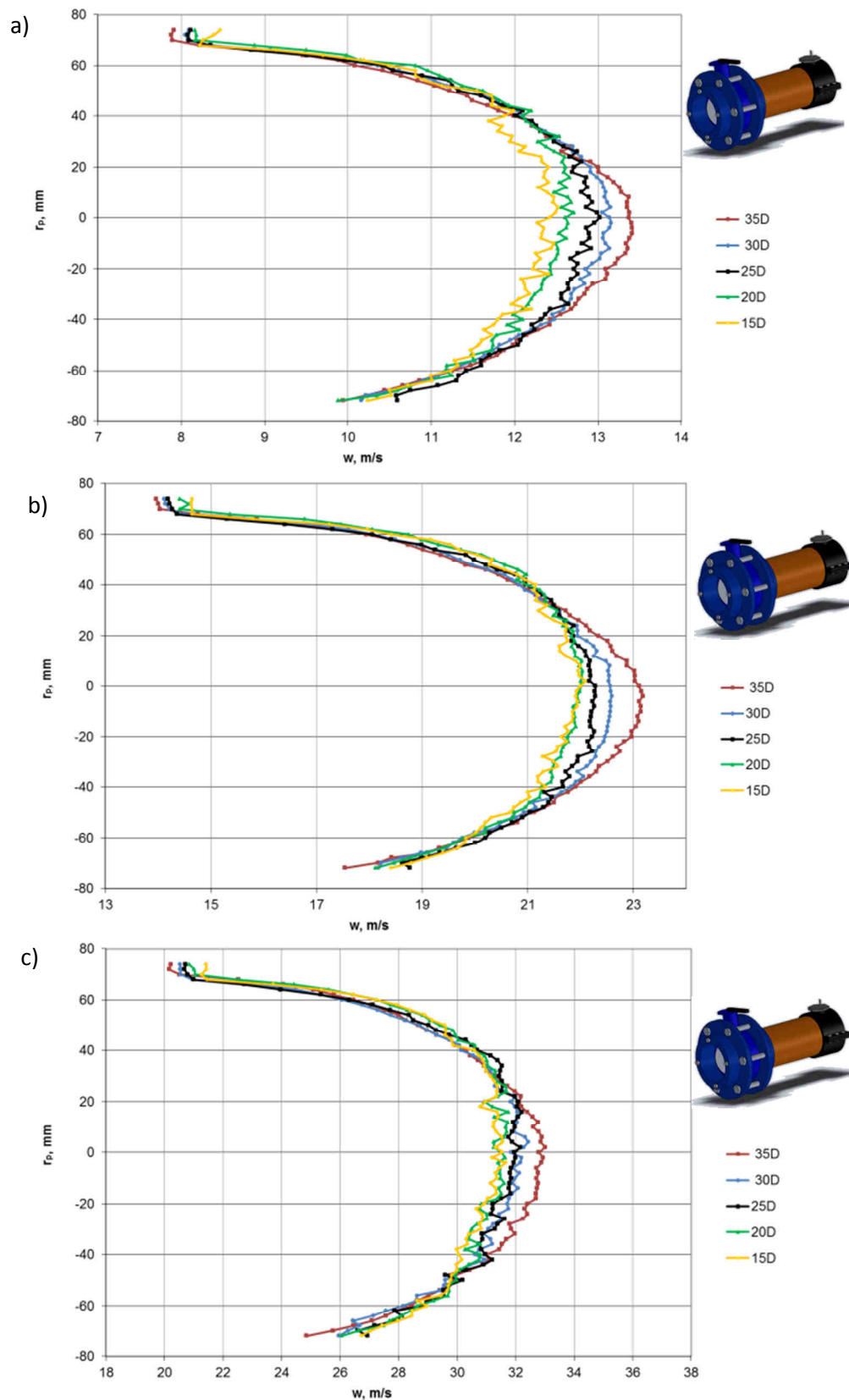
Na rys. 70÷73 przedstawiono wyznaczone profile prędkości w odległościach i płaszczyznach za przepustnicą w pełni otwartą, w których umieszczane były badane przepływomierze. Profile te wyznaczono dla trzech różnych średnich prędkości przepływu, odpowiednio 10m/s, 18m/s, 26m/s. Prędkość średnia w trakcie pomiarów ulegała fluktuacji w zakresie: $w_{sr} = 9,94 \div 10,11$, co odpowiada zmianom liczby Reynoldsa w zakresie $Re = 9,65 \times 10^4 \div 9,82 \times 10^4$, $w_{sr} = 17,86 \div 18,03$ co odpowiada zmianom liczby Reynoldsa w zakresie $Re = 1,73 \times 10^5 \div 1,75 \times 10^5$, $w_{sr} = 25,77 \div 26,07$ co odpowiada zmianom liczby Reynoldsa w zakresie $Re = 2,50 \times 10^5 \div 2,53 \times 10^5$. Zamieszczone w niniejszym rozdziale wyniki badań dotyczące profili prędkości składają się z 72 punktów pomiarowych. Wartości prędkości lokalnych w punktach pomiarowych przedstawione na wykresach 70÷73 są wynikiem uśredniania 870 pomiarów. Prędkość średnia (mierzona przy pomocy przepływomierza turbinowego) w trakcie realizacji badań, jak już wcześniej wspomniano ulegała fluktuacją w zakresie $\pm 3,0\%$ wartości zadanej, co mogło mieć wpływ na wyniki pomiarów prędkości lokalnych. Dla położenia pionowego rys. 70 oraz rys. 72 profile prędkości wykazują asymetryczny rozkład prędkości miejscowych w pobliżu ścianki rurociągu, dla wszystkich analizowanych wartości prędkości średnich. Jak już wspomniano wcześniej takie wyniki mogą być również spowodowane przyjętą techniką pomiarową, ponieważ niewielkie zmiany w położeniu sondy w bliskiej odległości od ścianki rurociągu, gdzie występuje duże gradienty prędkości mogą być powodem znacznych rozbieżności wyników pomiarów prędkości lokalnych. Profile prędkości przedstawione na rys. 71 oraz rys. 73 są wynikiem badań zrealizowanych podczas ustawienia poziomego układu pomiarowego. Profil prędkości już we względnej odległości 10 średnic od elementu zaburzającego jest bliski profilowi, który przyjęto jako w pełni rozwinięty. Dla układu zaburzającego w postaci przepustnicy całkowicie otwartej założono odległość od elementu zaburzającego równą 35-ciu średnic rurociągu, jako odległość, gdzie profil ulega stabilizacji, jest w pełni rozwinięty. Stosunek $\frac{w_{sr}}{w_{max}}$ dla odległości 35-ciu średnic jest zgodny z danymi literaturowymi [34].



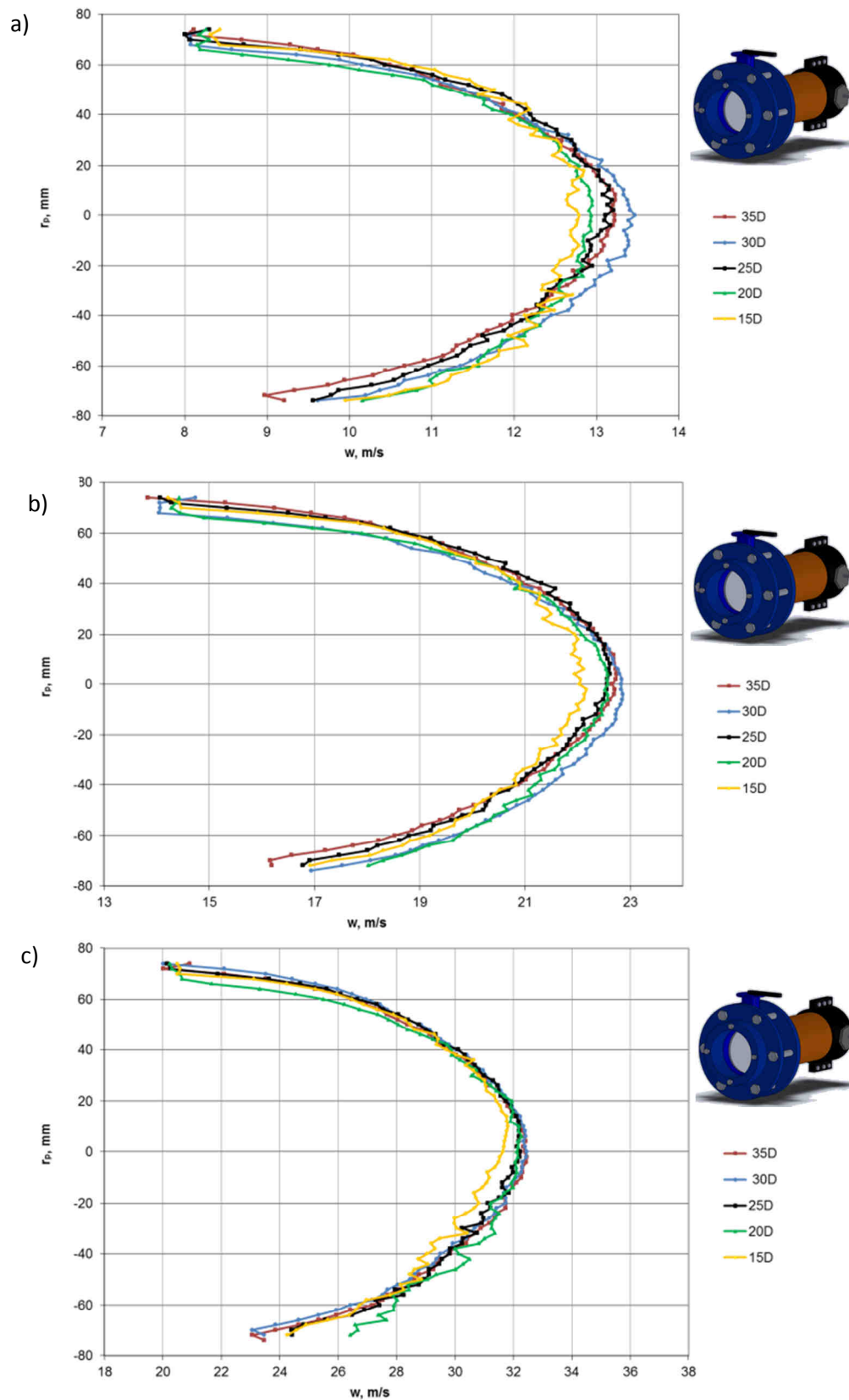
Rys. 70 Profile prędkości w odległościach 3D, 4D, 5D, 10D, 35D od elementu zaburzającego w postaci przepustnicy w pełni otwartej, położenie pionowe sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a) $10,00 \text{ m/s}$, b) $18,00 \text{ m/s}$, c) $26,00 \text{ m/s}$



Rys. 71 Profile prędkości w odległościach 3D, 4D, 5D, 10D, 35D od elementu zaburzającego w postaci przepustnicy w pełni otwartej, położenie poziome sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a) 10,00 m/s, b) 18,00 m/s, c) 26,00 m/s

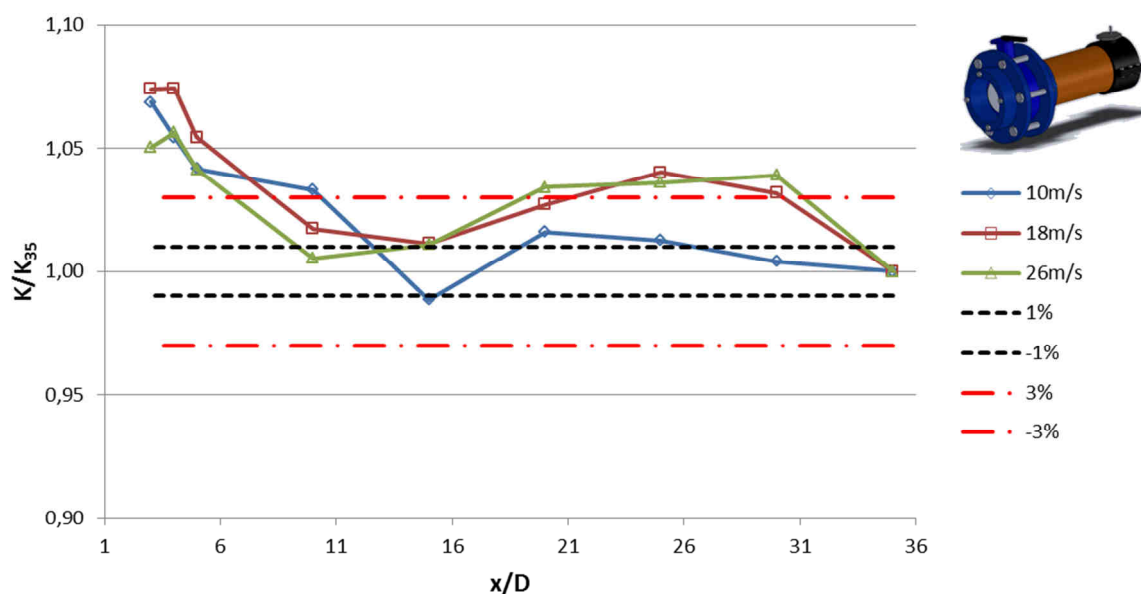


Rys. 72 Profile prędkości w odległościach 15D, 20D, 25D, 30D, 35D od elementu zaburzającego w postaci przepustnicy w pełni otwartej, położenie pionowe sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a) 10,00 m/s, b) 18,00 m/s, c) 26,00 m/s

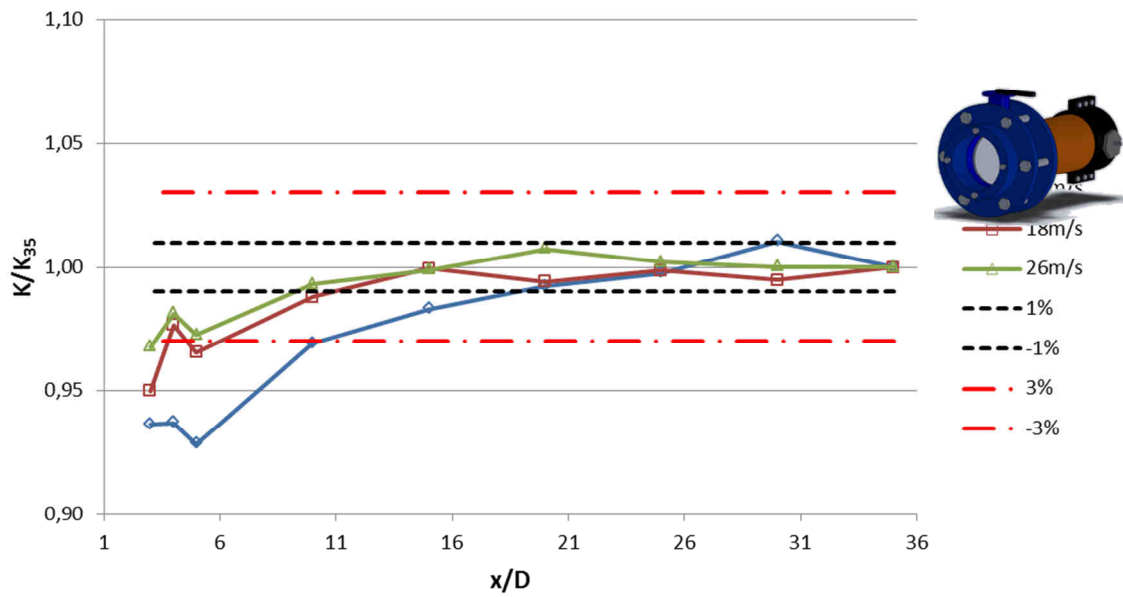


Rys. 73 Profile prędkości w odległościach 15D, 20D, 25D, 30D, 35D od elementu zaburzającego w postaci przepustnicy w pełni otwartej, położenie poziome sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a) 10,00 m/s, b) 18,00 m/s, c) 26,00 m/s

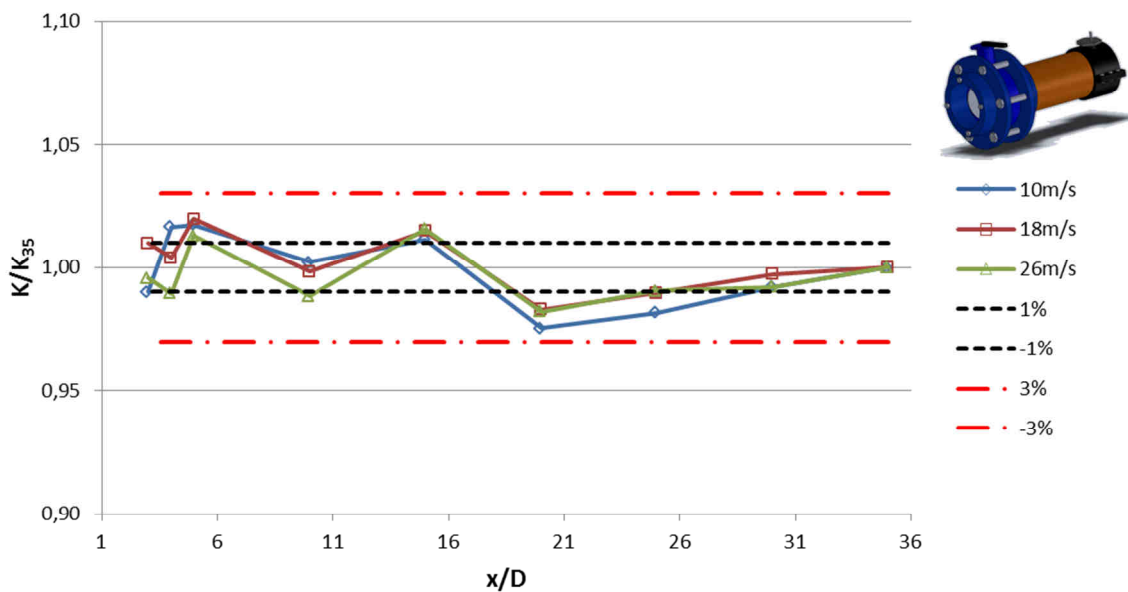
Wpływ zaburzenia strugi na wskazania przepływomierza analizowano wyznaczając współczynnik przepływu K dla danej lokalizacji przepływomierza do wartości K_{35} czyli wartości tego współczynnika w odległości 35 średnic rurociągu od przepustnicy w pełni otwartej, gdzie przyjęto, że profil prędkości jest w pełni rozwinięty. Na rys. 74 ÷ 79 podano wartości K/K_{35} dla trzech badanych przepływomierzy umieszczonych w dwóch różnych płaszczyznach dla wszystkich analizowanych prędkości średnich. W załączniku nr 5 zamieszczono dane pomiarowe wartości współczynnika przepływu K w funkcji prędkości, dla wszystkich analizowanych konstrukcji sond piętrzących, dla przepustnicy w pełni otwartej. Jak można zauważyć na poniższych wykresach położenie pionowe analizowanych rozwiązań konstrukcyjnych sond uśredniających ciśnienie dynamiczne jest metrologicznie korzystniejsze we wszystkich rozpatrywanych odległościach względem przepustnicy w pełni otwartej.



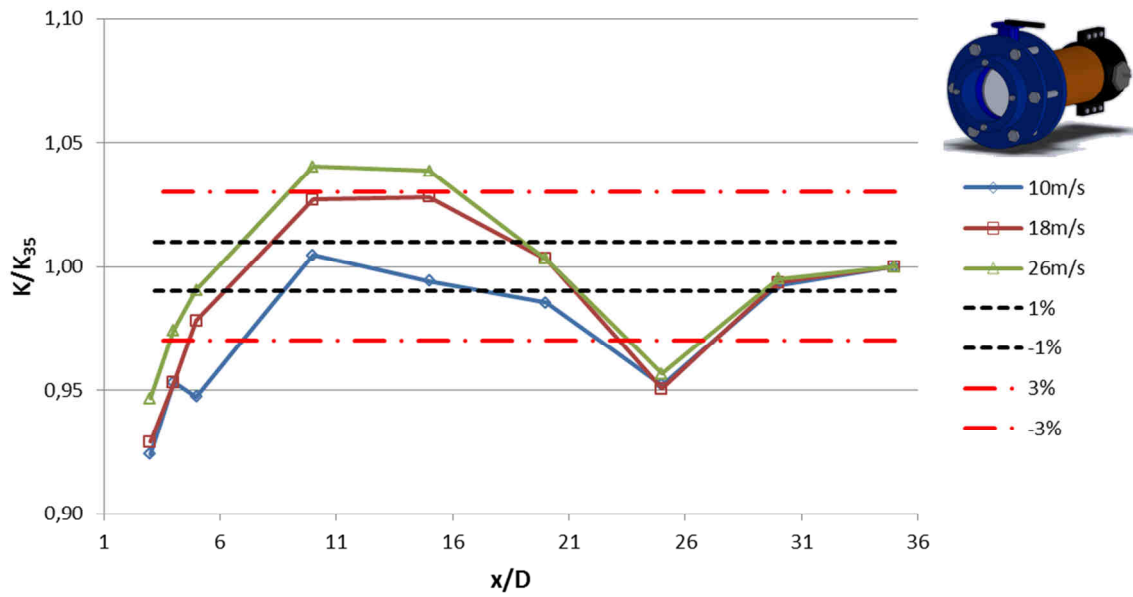
Rys. 74 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Introbar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy



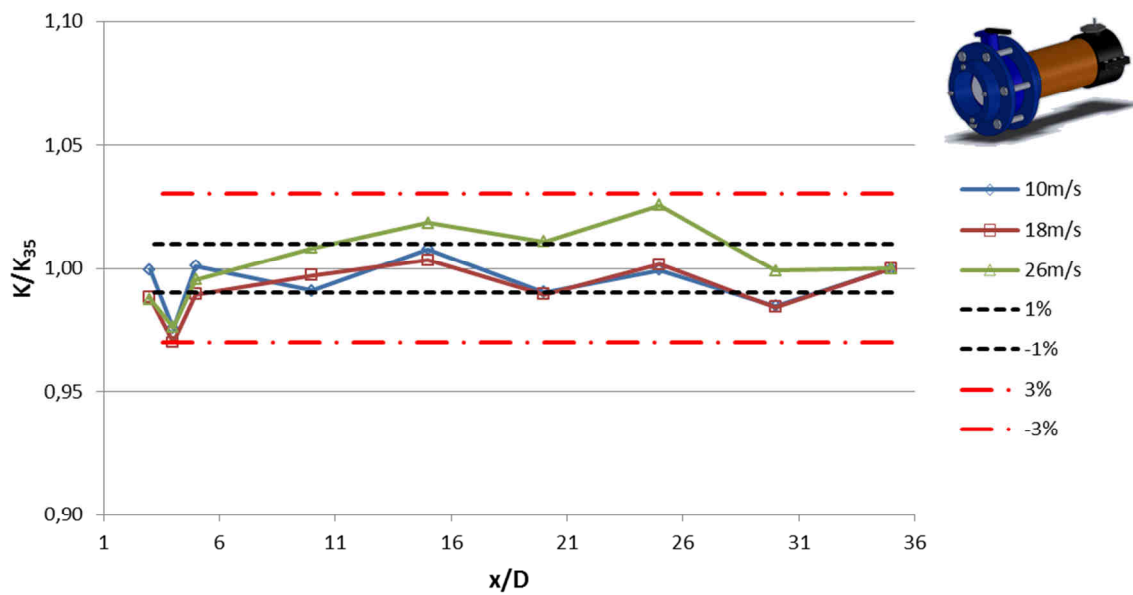
Rys. 75 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Introbar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy



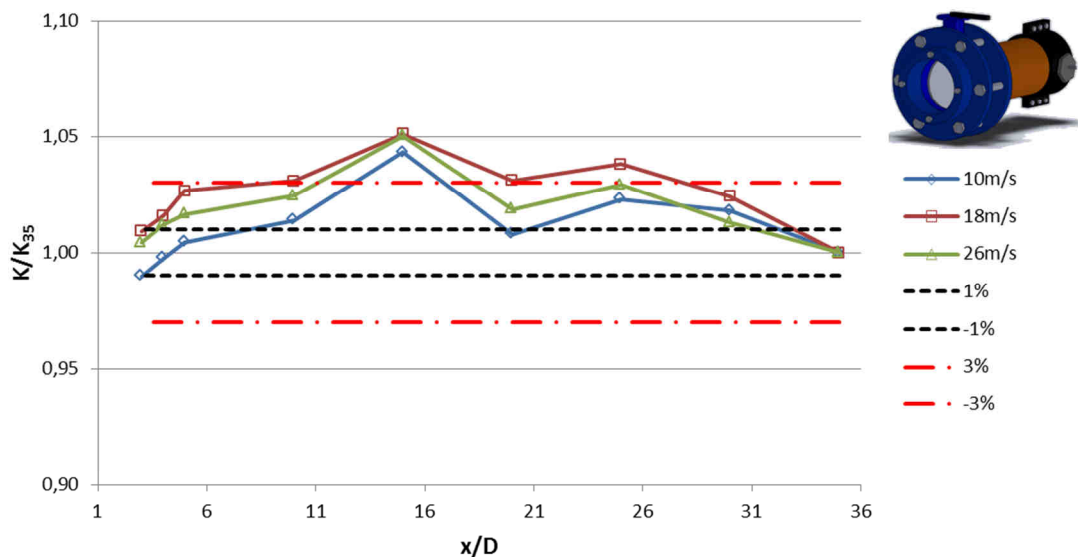
Rys. 76 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Accubar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy



Rys. 77 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Accubar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy

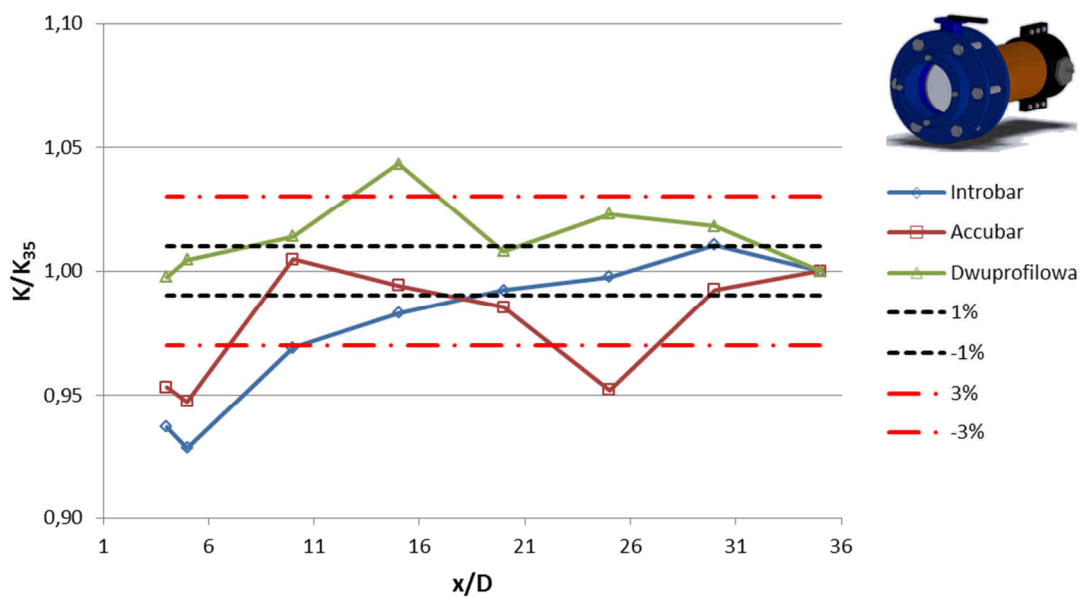


Rys. 78 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Dwuprofilowego w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy

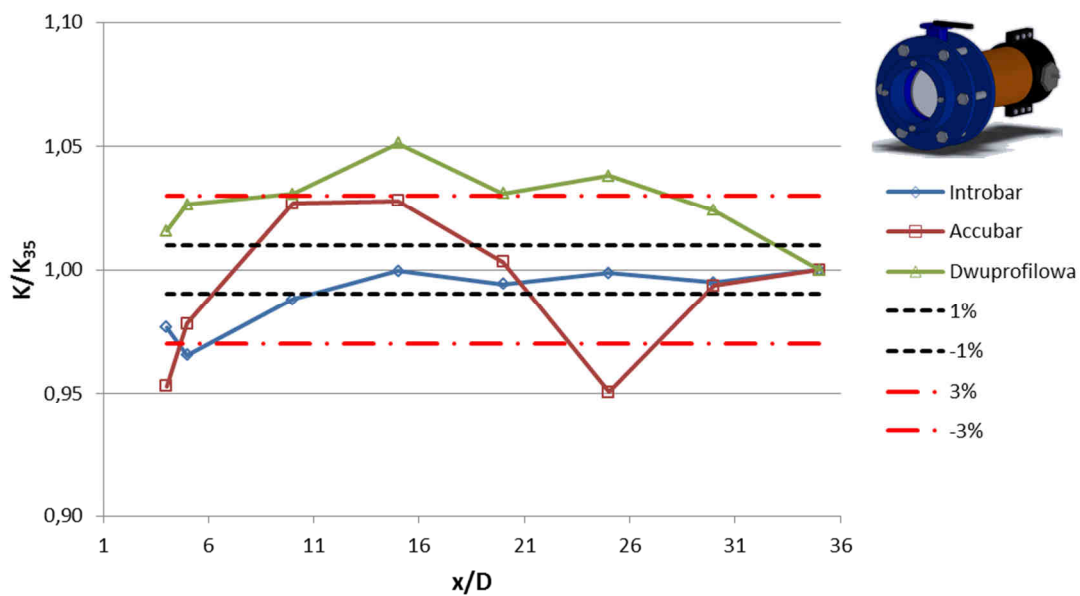


Rys. 79 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Dwuprofilowego w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy

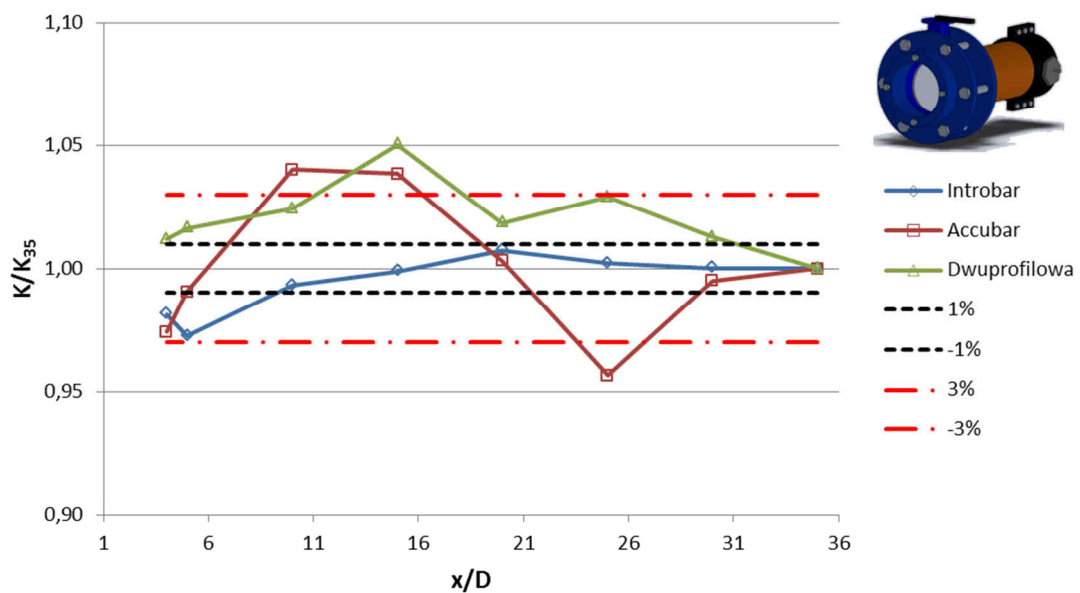
Na rys. 80 ÷ 85 zestawiono graficznie wartości K/K_{35} dla trzech badanych przepływomierzy umieszczonych w dwóch różnych płaszczyznach względem przepustnicy w pełni otwartej dla wszystkich analizowanych prędkości. Analiza poniższych wykresów pozwala na wybór przepływomierza, który jest najmniej wrażliwy na zaburzenie strugi płynu w konkretnym położeniu. Wpływ zaburzenia strugi na wskazania przepływomierza analizowano ustalając współczynnik przepływu K dla danej lokalizacji przepływomierza do wartości K_{35} , gdzie przyjęto, że profil prędkości jest w pełni rozwinięty.



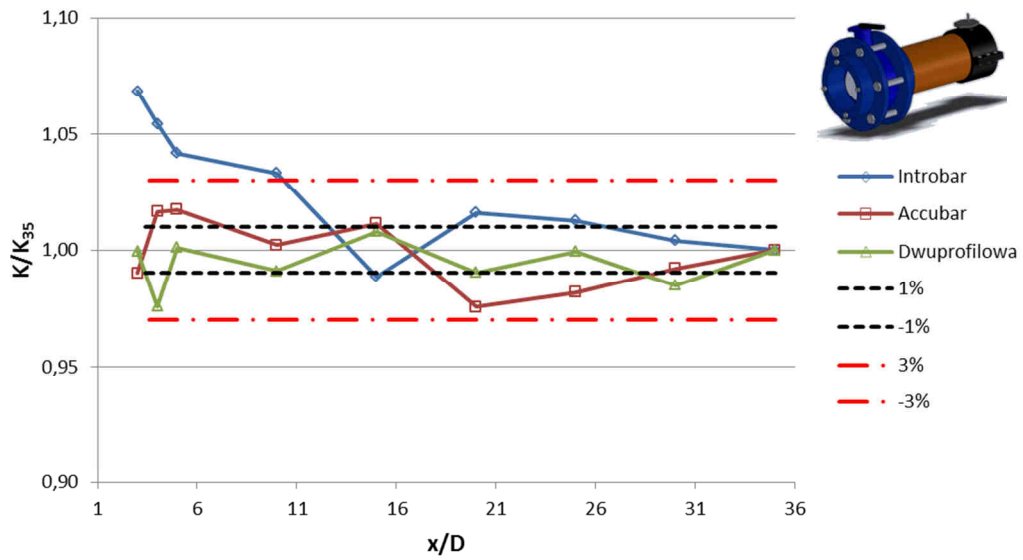
Rys. 80 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 10m/s oraz położenia poziomego sondy



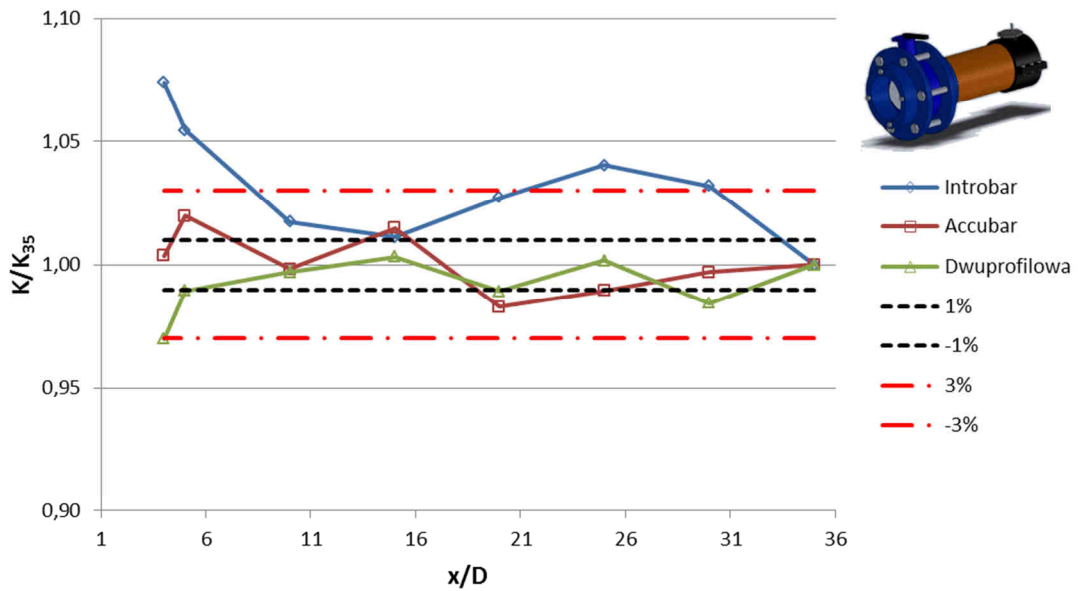
Rys. 81 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 18m/s oraz położenia poziomego sondy



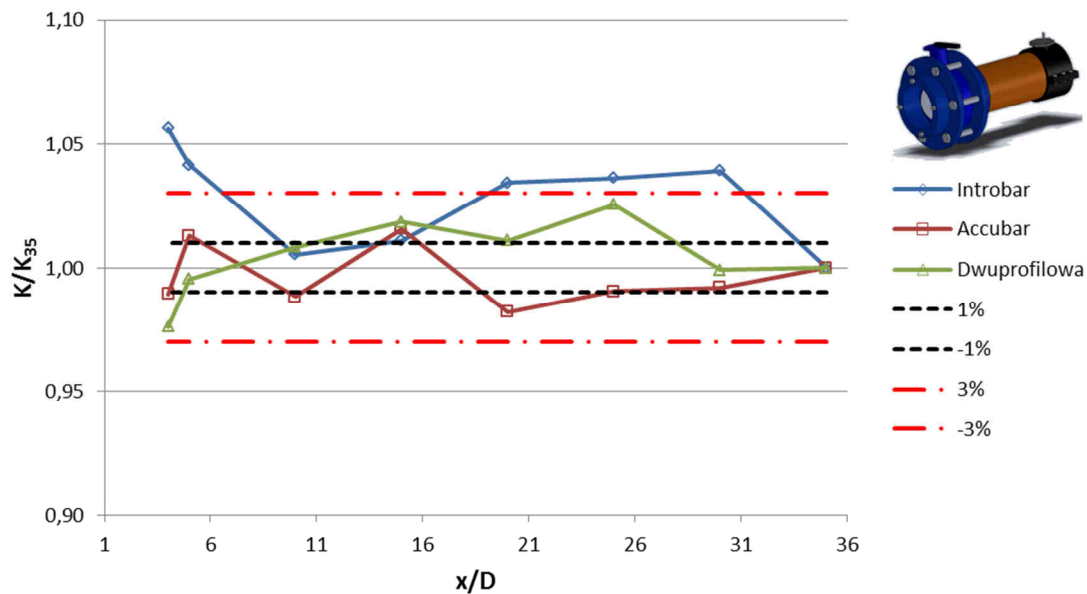
Rys. 82 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 26m/s oraz położenia poziomego sondy



Rys. 83 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 10m/s oraz położenia pionowego sondy

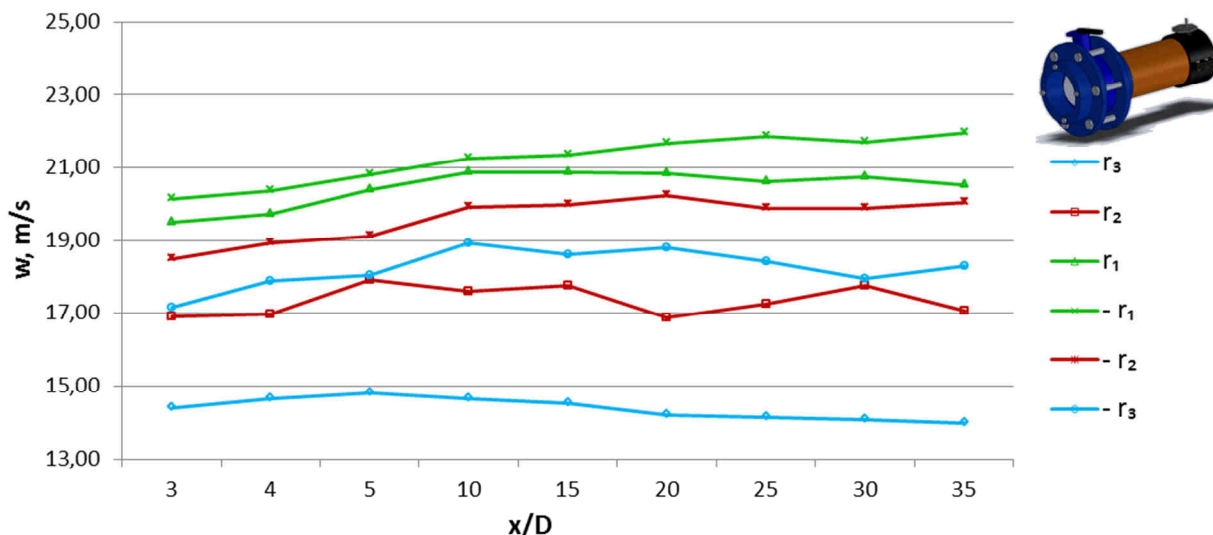


Rys. 84 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 18m/s oraz położenia pionowego sondy

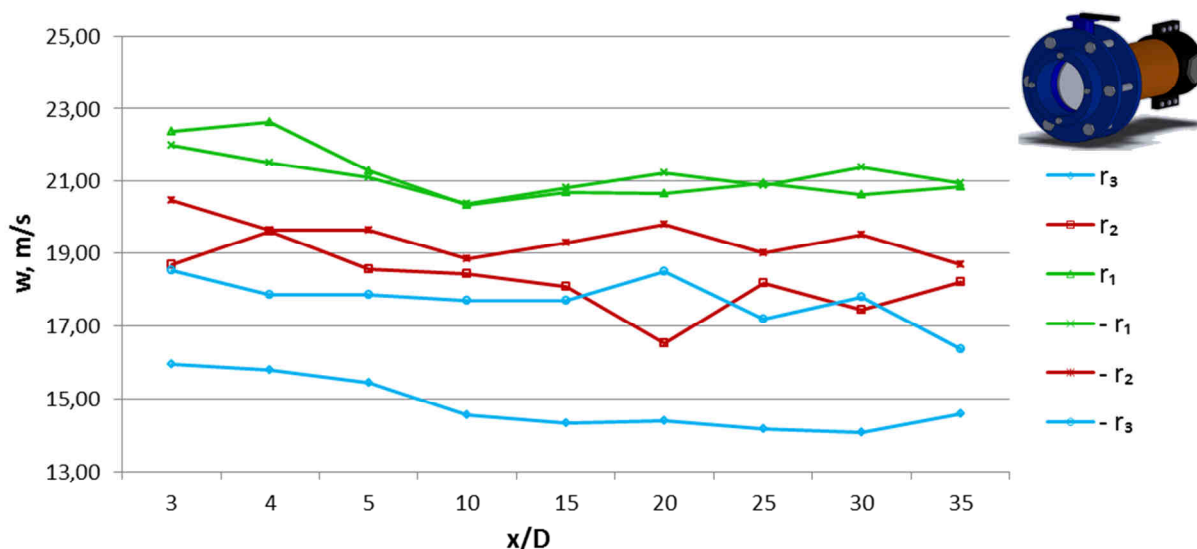


Rys. 85 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 26m/s oraz położenia pionowego sondy

Wyznaczone profile prędkości z krokiem 2mm dały możliwość przeprowadzenia analizy prędkości miejscowych, dla położenia odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych w badanych konstrukcjach sond piętzących. Rozmieszczenie otworków piezometrycznych badanych konstrukcji sond piętzących przedstawiono na rys. 47. Na rys. 86 ÷ 87 podano wartości prędkości miejscowych w lokalizacjach odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych badanych przepływomierzy. Sondy umieszczano w pionie oraz poziomie, dla przepustnicy w pełni otwartej przy prędkości średniej 18m/s. Prędkości lokalne w poszczególnych parach otworków piezometrycznych wraz ze zwiększaniem odległości od elementu zaburzającego przyjmują zbliżone wartości, co świadczy o fakcie iż profil prędkości ulega stabilizacji. Wartości w skrajnych otworkach piezometrycznych (r_3 oraz $-r_3$) nie zbiegają się. Niewielkie zmiany w położeniu sondy w bliskiej odległości od ścianki rurociągu, gdzie występuje duże gradienty prędkości mogą być powodem znacznych rozbieżności wyników pomiarów prędkości lokalnych. Rozbieżności mogą również wynikać ze zmian prędkości średniej wokół danego przepływu. Położenie pionowe sondy względem przepustnicy w pełni otwartej jest metrologicznie korzystniejsze dla wszystkich analizowanych odległości od elementu zaburzającego.



Rys. 86 Wartości prędkości miejscowych w lokalizacjach odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych badanych przepływomierzy, przepustnica w pełni otwarta, położenie pionowe, prędkość średnia 18m/s



Rys. 87 Wartości prędkości miejscowych w lokalizacjach odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych badanych przepływomierzy, przepustnica w pełni otwarta, położenie poziome, prędkość średnia 18m/s

W tabeli 8 zestawiono odchyłki współczynników przepływu $K_{\dot{v}rx/D}$ od $K_{\dot{v}r35}$ analizowanych sond piętrzących w różnych odległościach od elementu zaburzającego. Wartości $K_{\dot{v}rx/D}$ zostały uśrednione dla całego zakresu analizowanych prędkości (10÷30m/s- 93 punkty pomiarowe) a następnie odniesione do współczynnika przepływu wyznaczonego dla położenia, gdzie profil prędkości był w pełni rozwinięty. Dla układu zaburzającego w postaci przepustnicy w pełni otwartej $K_{\dot{v}r35}$ (10÷30m/s- 93 punkty pomiarowe) wyznaczono w odległości $x/D=35$. Zestawienie odchyłek $K_{\dot{v}rx/D}$ od $K_{\dot{v}r35}$ wykonano korzystając z zależności (15).

Miejsca metrologicznie niekorzystne, dla których niepewność dodatkowa związana z lokalizacją czujnika δK_{lok} jest większe od $\pm 3,0\%$ w tabeli oznaczono kolorem czerwonym.

Tab. 8 Zestawienie niepewności dodatkowej związanej z lokalizacją czujnika δK_{lok} analizowanych sond piętrzących w różnych odległościach od przepustnicy w pełni otwartej

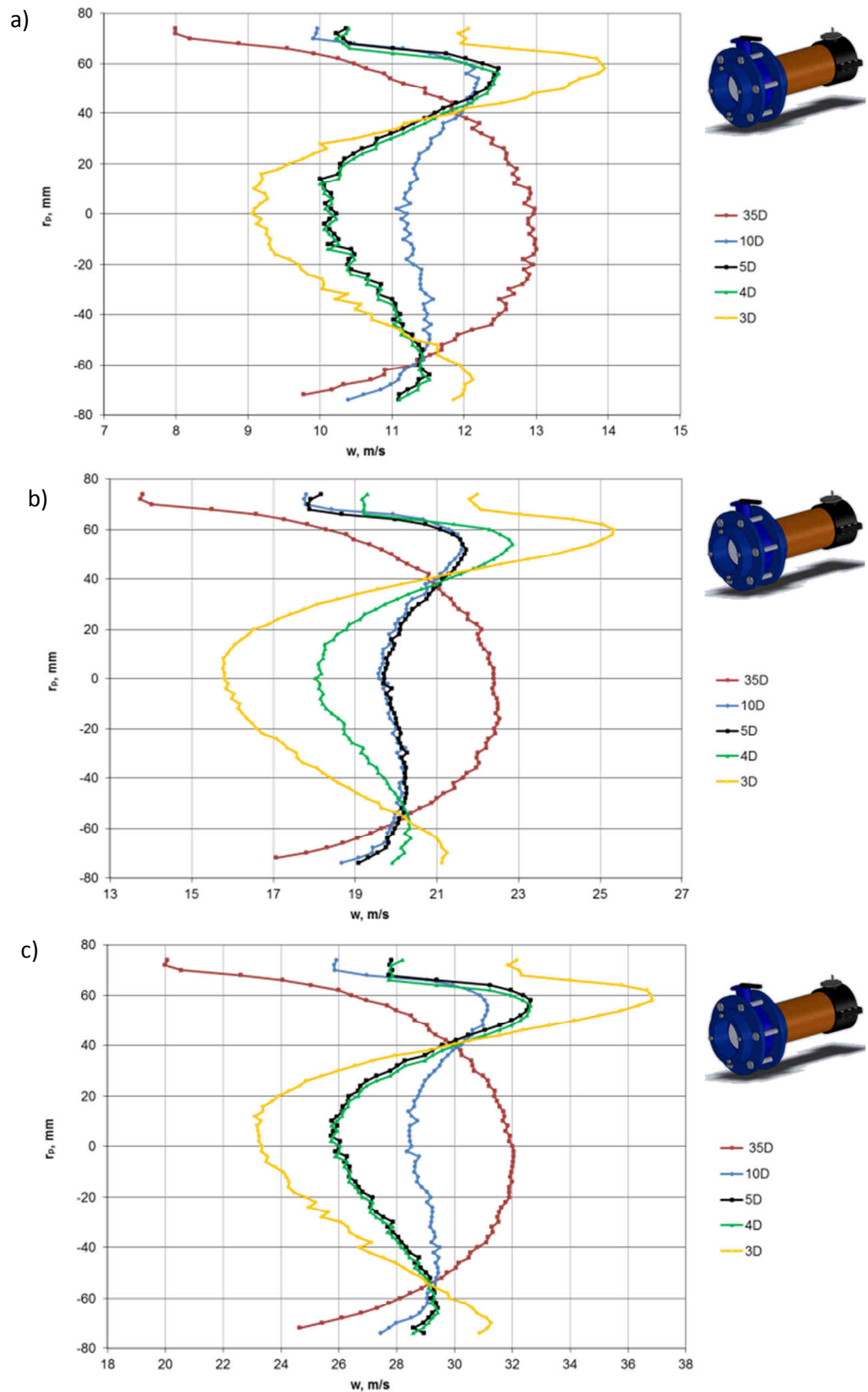
SONDA INTROBAR									
δK_{lok}	3D	4D	5D	10D	15D	20D	25D	30D	35D
Pion	6,4%	6,2%	4,9%	1,2%	0,7%	3,0%	3,1%	3,0%	0,0%
Poziom	-4,9%	-3,1%	-4,3%	-1,8%	-0,8%	-0,3%	0,2%	0,0%	0,0%
SONDA DWUPROFILOWA									
δK_{lok}	3D	4D	5D	10D	15D	20D	25D	30D	35D
Pion	-0,7%	-2,4%	-0,4%	0,1%	1,0%	-0,3%	1,3%	-1,1%	0,0%
Poziom	0,4%	1,1%	1,8%	2,5%	4,2%	2,1%	3,1%	1,6%	0,0%
SONDA OPLYWOWA ANNUBAR									
δK_{lok}	3D	4D	5D	10D	15D	20D	25D	30D	35D
Pion	0,3%	-0,1%	2,0%	-0,6%	1,0%	-1,9%	-1,3%	-0,9%	0,0%
Poziom	-6,6%	-3,7%	-2,1%	3,0%	2,7%	-0,1%	-4,5%	-0,6%	0,0%

Zamieszczone w niniejszym rozdziale wyniki pomiarów i obliczeń wskazują, że profil prędkości w bliskim sąsiedztwie za przepustnicą w pełni otwartą dla położenia pionowego elementu mierniczego nie wykazuje zaburzonego charakteru przepływu dla wszystkich analizowanych prędkości. Jedynie w przypadku ustawienia przepływomierza w poziomie względem przepustnicy w pełni otwartej w odległościach 3D÷10D profil prędkości wykazuje symetryczne zaburzenie co, powoduje odchylenie współczynnika przepływu od wartości K_{35} dla przepływu niezaburzonego. Większy jest zakres tych zmian w przypadku sondy Annubar oraz Introbar aniżeli sondy Dwuprofilowej. Zakres tych zmian jest większy w przypadku położenia sond w poziomie względem przepustnicy, gdzie zaburzenie profilu jest symetryczne dla wszystkich analizowanych sond. Pionowe położenie czujnika jest metrologicznie korzystniejsze. Szczególnie jest to widoczne w przypadku sondy Dwuprofilowej, dla której odchyłka od wartości δK_{lok} nie przekracza $\pm 2,4\%$. Ta odchyłka na całym badanym odcinku, na którym były instalowane przepływomierze świadczy o tym, że sonda Dwuprofilowa jest mniej wrażliwa na symetryczną deformację profilu prędkości od pozostałych sond. Zagadnienie to wymaga dalszych badań, na większych średnicach rurociągów. Wyniki badań wskazują na znaczną odchyłkę współczynnika K w przypadku sondy o przekroju kołowym przy umieszczeniu jej w położeniu poziomym

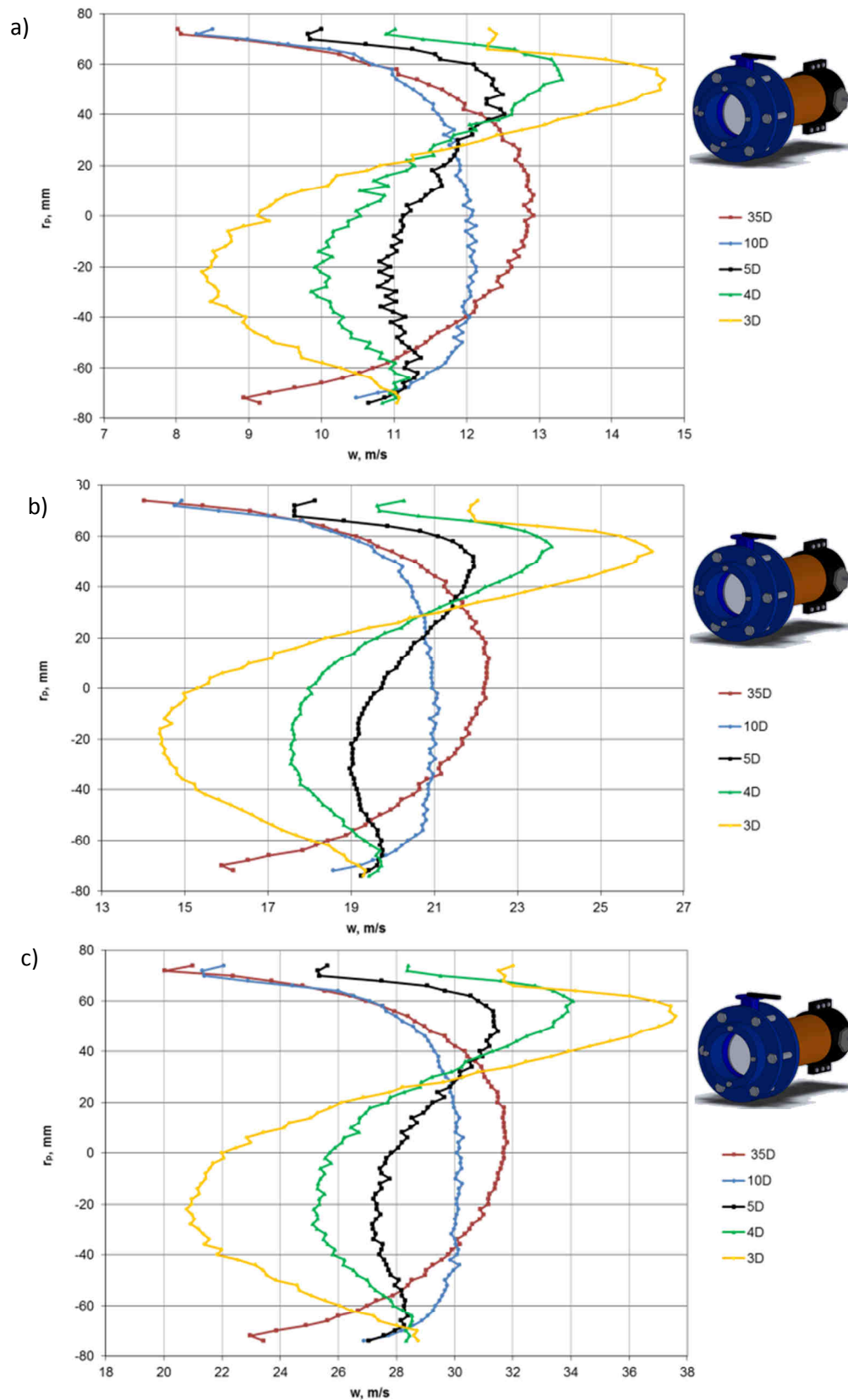
w odległości $25D$ od przepustnicy w pełni otwartej. Wskazuje to na brak możliwości stosowania sondy o przekroju kołowym w tych warunkach. Sonda Introbar z kolei dla położenia pionowego oraz poziomego w odległościach $3\div 5D$ wykazuje odchyłkę od wartości δK_{lok} przekraczającą w skrajnych przypadkach $\pm 6,0\%$ co nie powinno stanowić zachęty do jej stosowania w takim położeniu. Zauważalny jest również wpływ wartości średniej prędkości na wartość współczynnika K . Dla przepustnicy w pełni otwartej spośród analizowanych kształtów, najlepsze wyniki metrologiczne daje sonda Dwuprofilowa.

6.1.4 Wyniki badań analizowanych konstrukcji sond piętujących w warunkach zaburzonego przepływu przepustnicą otwartą w 50%

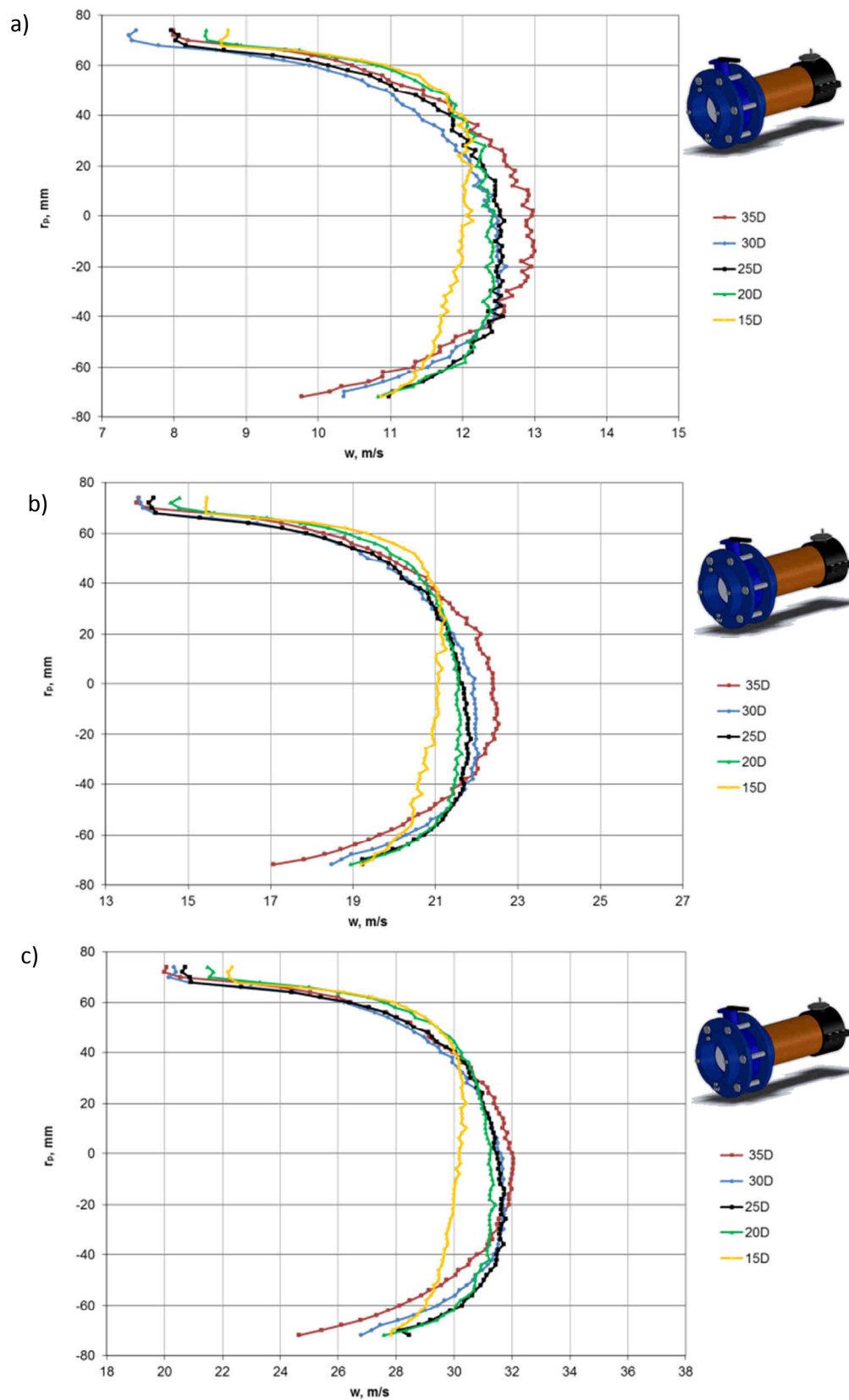
Na rys. 88÷91 przedstawiono wyznaczone profile prędkości w odległościach i płaszczyznach za przepustnicą otwartą w 50%, w których umieszczane były badane przepływomierze. Profile te wyznaczono dla trzech różnych średnich prędkości przepływu, odpowiednio 10m/s, 18m/s, 26m/s. Prędkość średnia w trakcie pomiarów ulegała fluktuacji w zakresie: $w_{\text{sr}} = 9,94 \div 10,11$ co odpowiada zmianom liczby Reynoldsa w zakresie $Re = 9,65 \times 10^4 \div 9,82 \times 10^4$, $w_{\text{sr}} = 17,83 \div 18,12$ co wpływa na zmianę liczby Reynoldsa w zakresie $Re = 1,73 \times 10^5 \div 1,76 \times 10^5$, $w_{\text{sr}} = 25,71 \div 26,07$ co odpowiada zmianom liczby Reynoldsa w zakresie $Re = 2,50 \times 10^5 \div 2,53 \times 10^5$. Zamieszczone w niniejszym rozdziale wyniki badań dotyczące profili prędkości składają się z 72 punktów pomiarowych, analogicznie jak dla pozostałych elementów zaburzających. Wartości prędkości lokalnych w punktach pomiarowych przedstawione na wykresach 88÷91 są wynikiem uśredniania 870 pomiarów. Prędkość średnia (mierzona przy pomocy przepływomierza turbinowego) w trakcie realizacji badań, jak już wcześniej wspomniano ulegała fluktuacjom w zakresie $\pm 3,0\%$ wartości zadanej, co mogło mieć wpływ na wyniki pomiarów prędkości lokalnych. Dla położenia pionowego rys. 88 oraz rys. 90 profile prędkości wykazują asymetryczny rozkład prędkości miejscowych w pobliżu ścianki rurociągu, dla wszystkich analizowanych wartości prędkości średnich. Jak już wspomniano wcześniej takie wyniki mogą być spowodowane przyjętą techniką pomiarową, ponieważ niewielkie zmiany w położeniu sondy w bliskiej odległości od ścianki rurociągu, mogą być powodem znacznych rozbieżności wyników pomiarów prędkości lokalnych. Profile prędkości przedstawione na rys. 89 oraz rys. 91 są wynikiem badań zrealizowanych podczas ustawienia poziomego układu pomiarowego. Profil prędkości już we względnej odległości 10 średnic od elementu zaburzającego, podobnie jak dla przepustnicy w pełni otwartej, jest bliski profilowi, który przyjęto jako w pełni rozwinięty. Dla układu zaburzającego w postaci przepustnicy otwartej w 50% założono odległość od elementu zaburzającego równą 35-ciu średnic rurociągu, jako odległość gdzie profil ulega stabilizacji, czyli jest w pełni rozwinięty. Stosunek $\frac{w_{\text{sr}}}{w_{\text{max}}}$ dla odległości 35-ciu średnic jest zgodny z danymi literaturowymi [34].



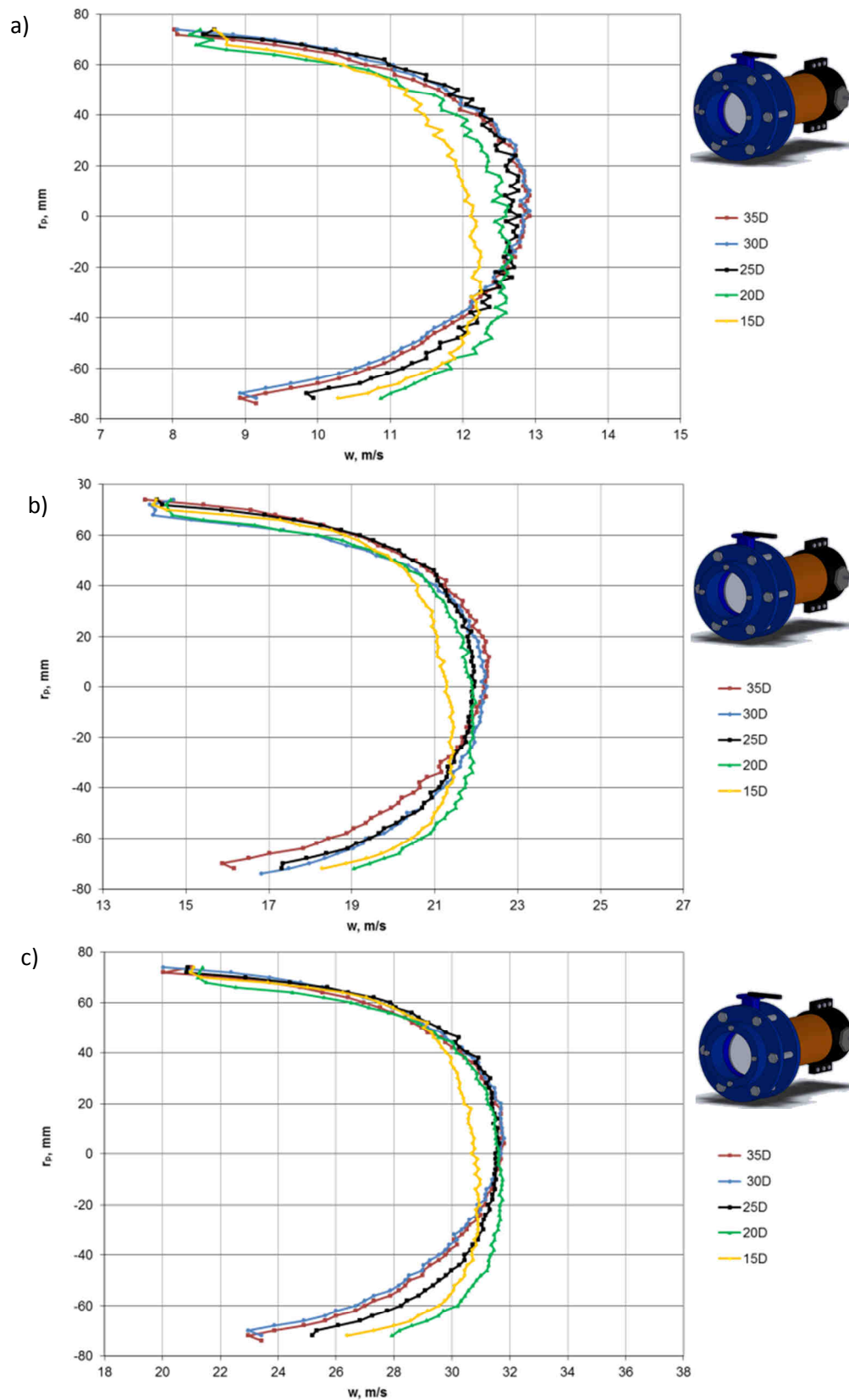
Rys. 88 Profile prędkości w odległościach 3D, 4D, 5D, 10D, 35D od elementu zaburzającego w postaci przepustnicy otwartej w 50%, położenie pionowe sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a) 10,00 m/s, b) 18,00 m/s, c) 26,00 m/s



Rys. 89 Profile prędkości w odległościach 3D, 4D, 5D, 10D, 35D od elementu zaburzającego w postaci przepustnicy otwartej w 50%, położenie poziome sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a) 10,00 m/s, b) 18,00 m/s, c) 26,00 m/s

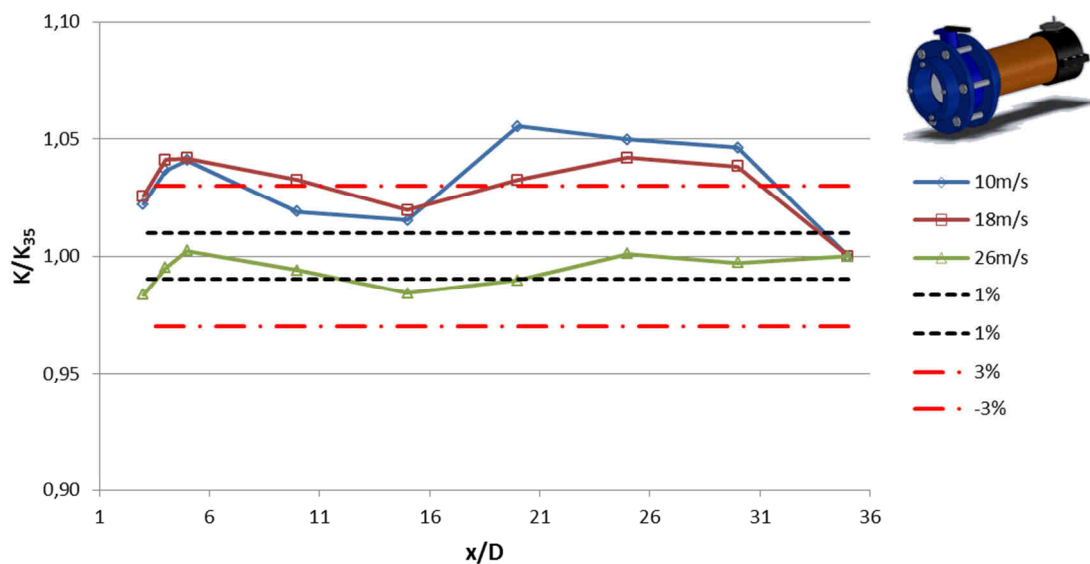


Rys. 90 Profile prędkości w odległościach 15D, 20D, 25D, 30D, 35D od elementu zaburzającego w postaci przepustnicy otwartej w 50%, położenie pionowe sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a) 10,00 m/s, b) 18,00 m/s, c) 26,00 m/s

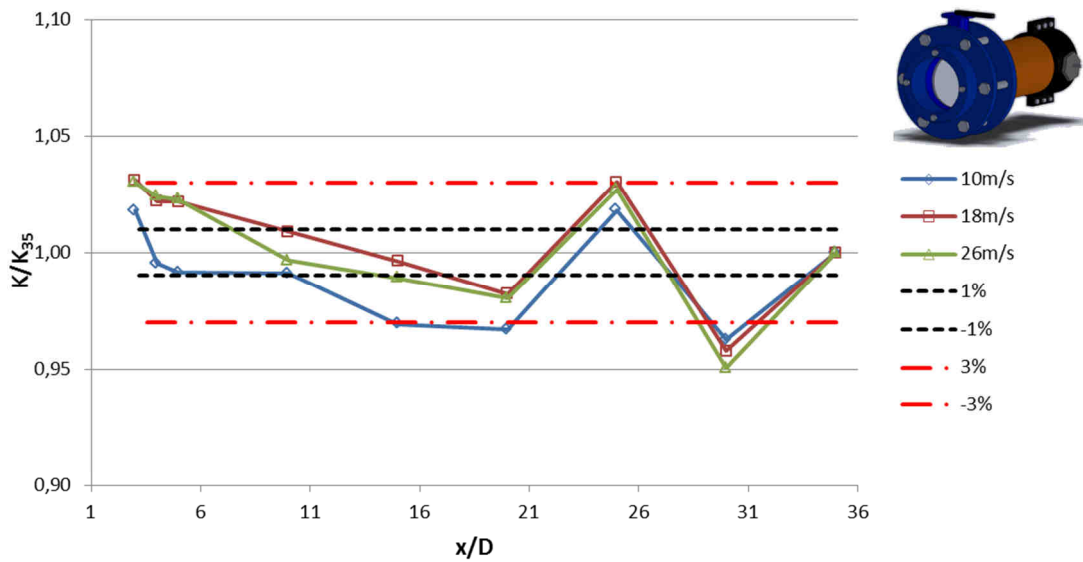


Rys. 91 Profile prędkości w odległościach 15D, 20D, 25D, 30D, 35D od elementu zaburzającego w postaci przepustnicy otwartej w 50%, położenie poziome sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a) 10,00 m/s, b) 18,00 m/s, c) 26,00 m/s

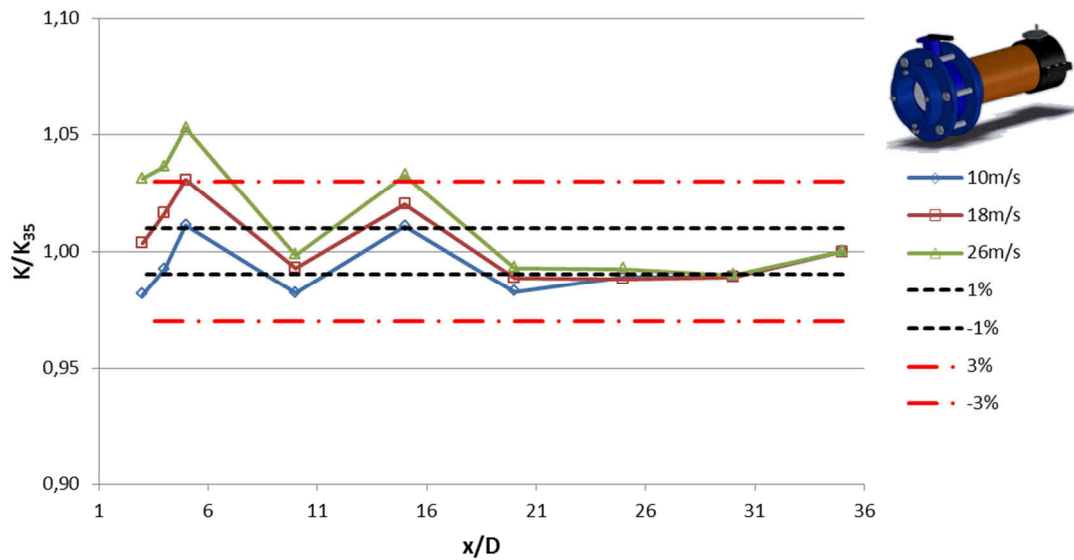
Wpływ zaburzenia strugi na wskazania przepływomierza analizowano wyznaczając współczynnik przepływu K dla danej lokalizacji przepływomierza do wartości K_{35} czyli wartości tego współczynnika w odległości 35 średnic rurociągu od przepustnicy otwartej w 50%, gdzie przyjęto, że profil prędkości jest w pełni rozwinięty. Na rys. 92÷97 podano wartości K/K_{35} dla trzech badanych przepływomierzy umieszczonych w dwóch położeniach względem elementu zaburzającego dla wszystkich analizowanych prędkości. W załączniku nr 6 zamieszczono dane pomiarowe wartości współczynnika przepływu K w funkcji prędkości, wszystkich analizowanych konstrukcji sond piętrzących, dla przepustnicy otwartej w 50%. Jak można zauważyć na poniższych wykresach położenie pionowe analizowanych rozwiązań konstrukcyjnych sond uśredniających ciśnienie dynamiczne jest metrologicznie korzystniejsze we wszystkich rozpatrywanych odległościach względem przepustnicy otwartej w 50% podobnie jak dla przepustnicy w pełni otwartej.



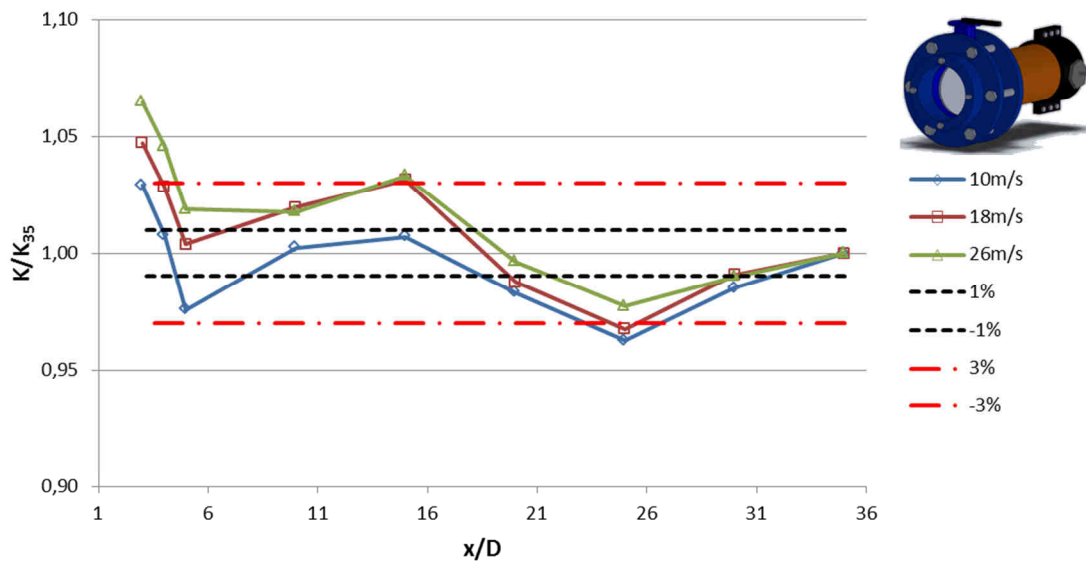
Rys. 88 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Introbar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy



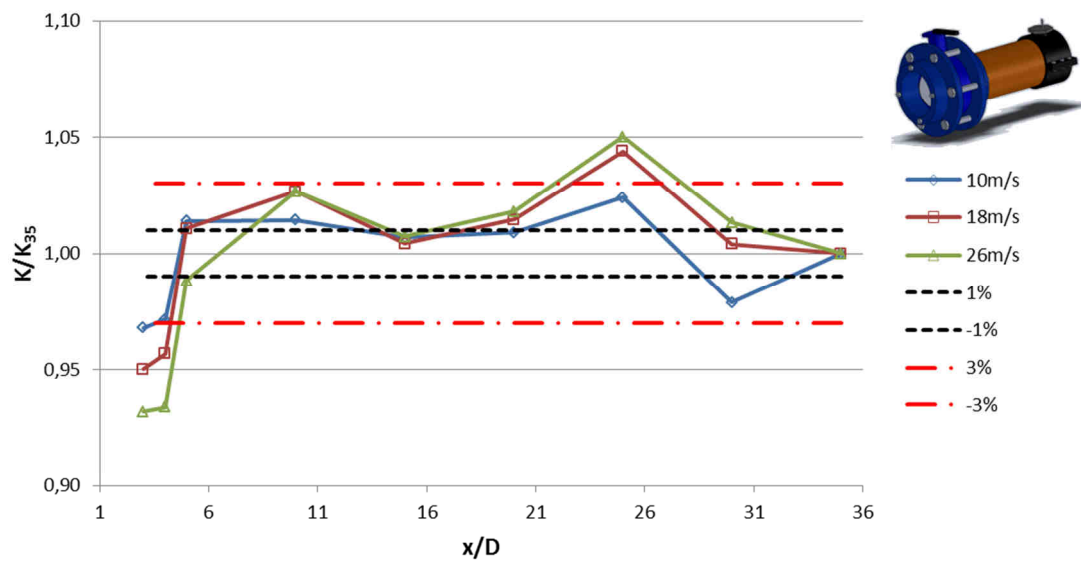
Rys. 89 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Introbar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy



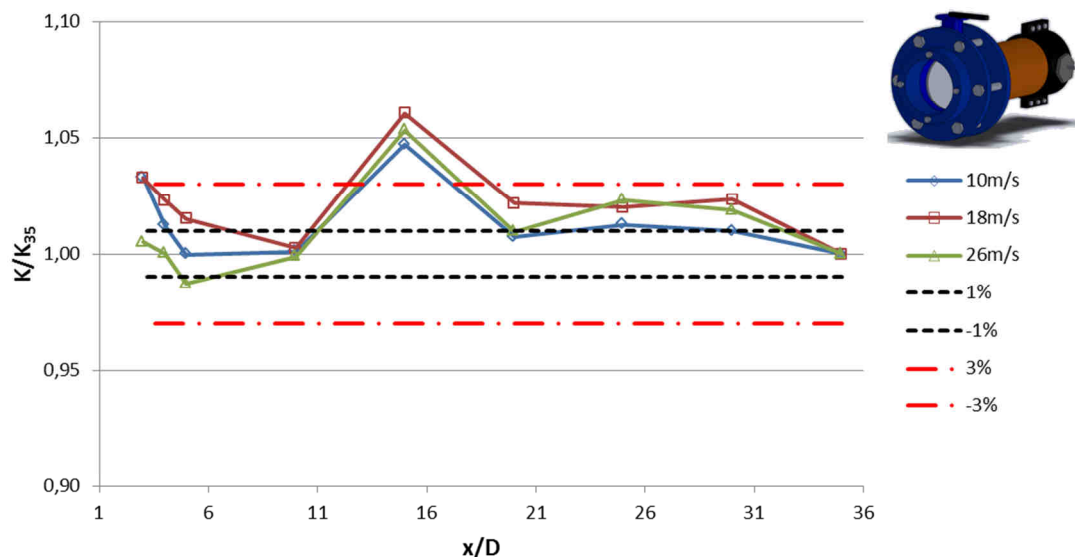
Rys. 90 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Accubar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy



Rys. 91 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Accubar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy

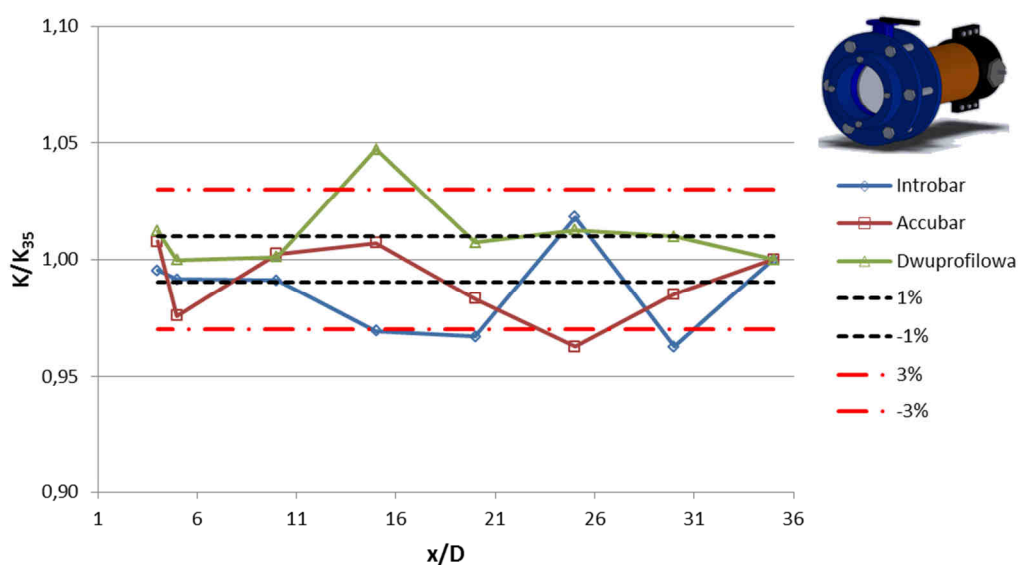


Rys. 92 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Dwuprofilowego w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy

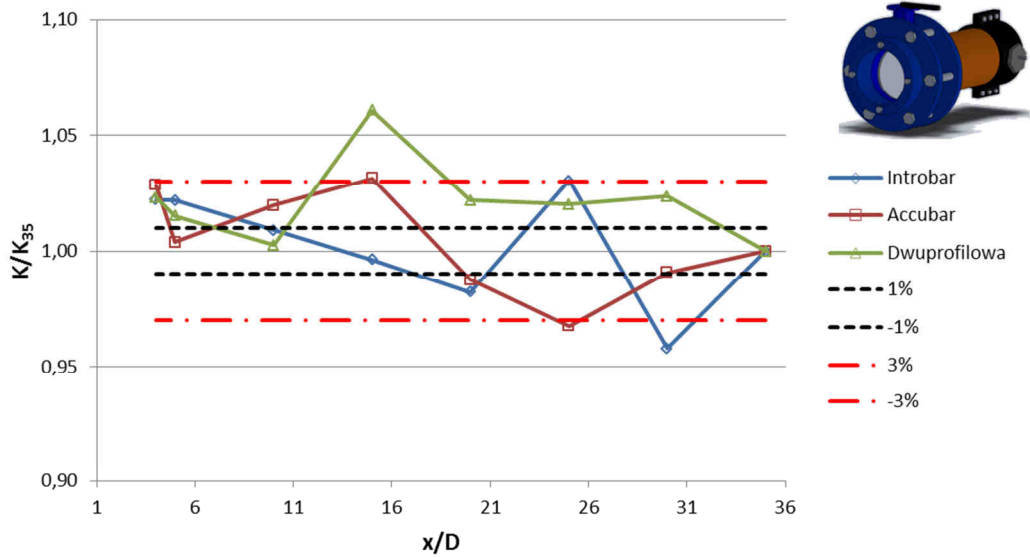


Rys. 93 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Dwuprofilowego w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy

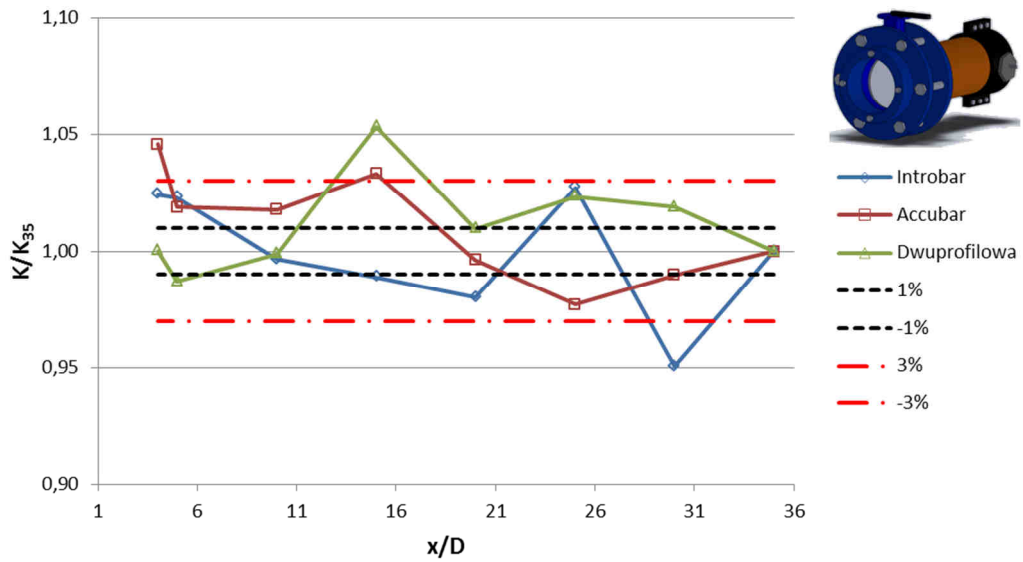
Na rys. 98 ÷ 103 zestawiono graficznie wartości K/K_{35} dla trzech badanych przepływomierzy umieszczonych w dwóch położeniach pionowym oraz poziomym dla wszystkich analizowanych prędkości. Analiza poniższych wykresów pozwala na wybór przepływomierza, który jest najmniej wrażliwy na zaburzenie strugi płynu w konkretnym położeniu. Wpływ zaburzenia strugi na wskazania przepływomierza analizowano ustalając współczynnik przepływu K dla danej lokalizacji przepływomierza do wartości K_{35} , gdzie przyjęto, że profil prędkości jest w pełni rozwinięty.



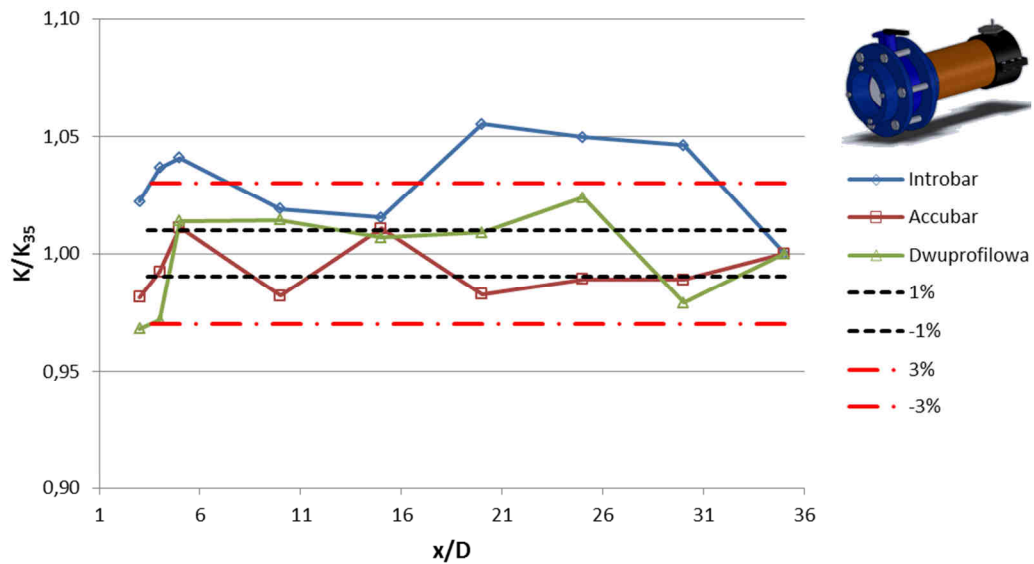
Rys. 94 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 10m/s oraz położenia poziomego sondy



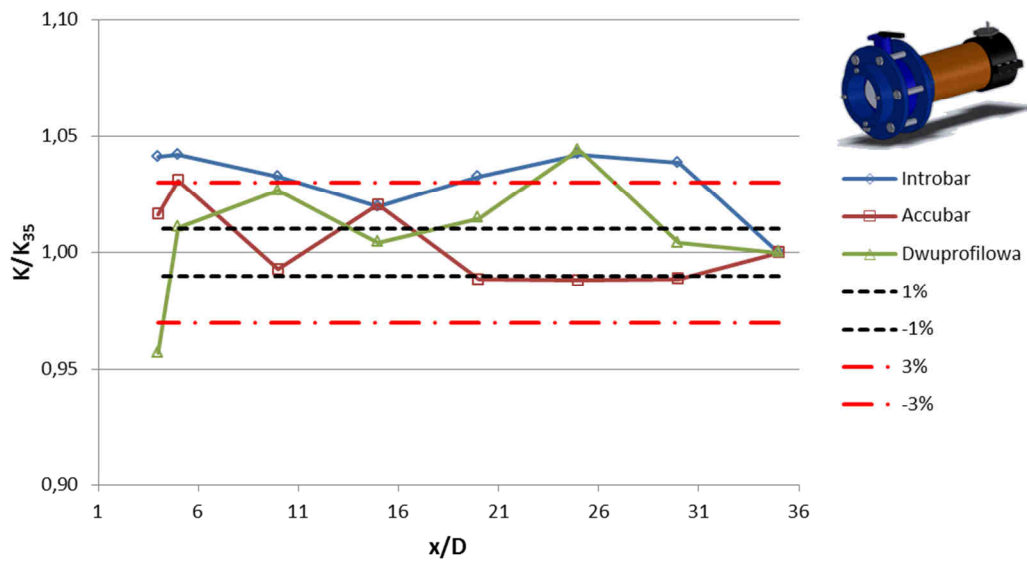
Rys. 95 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 18m/s oraz położenia poziomego sondy



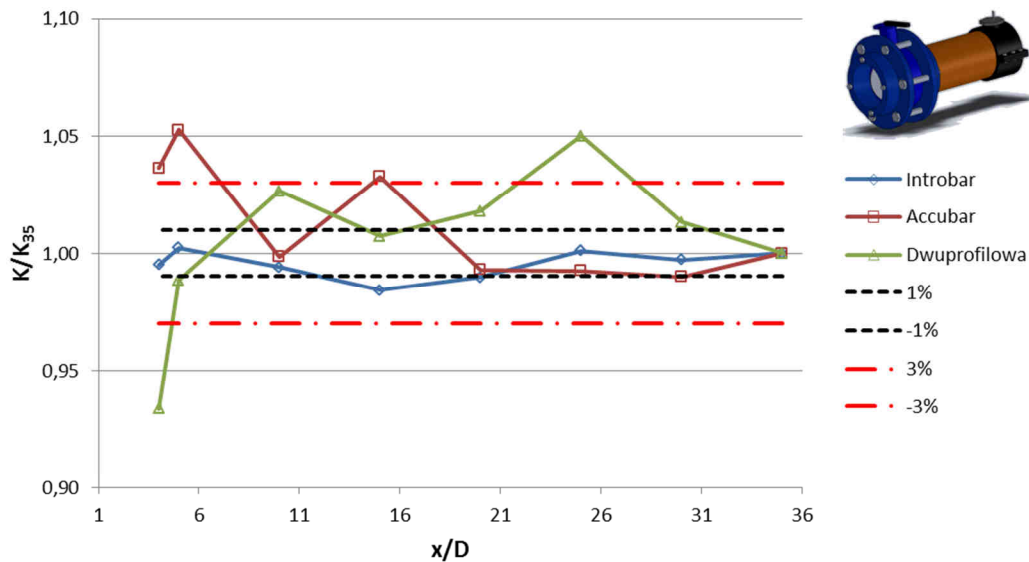
Rys. 96 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 26m/s oraz położenia poziomego sondy



Rys. 97 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 10m/s oraz położenia pionowego sondy

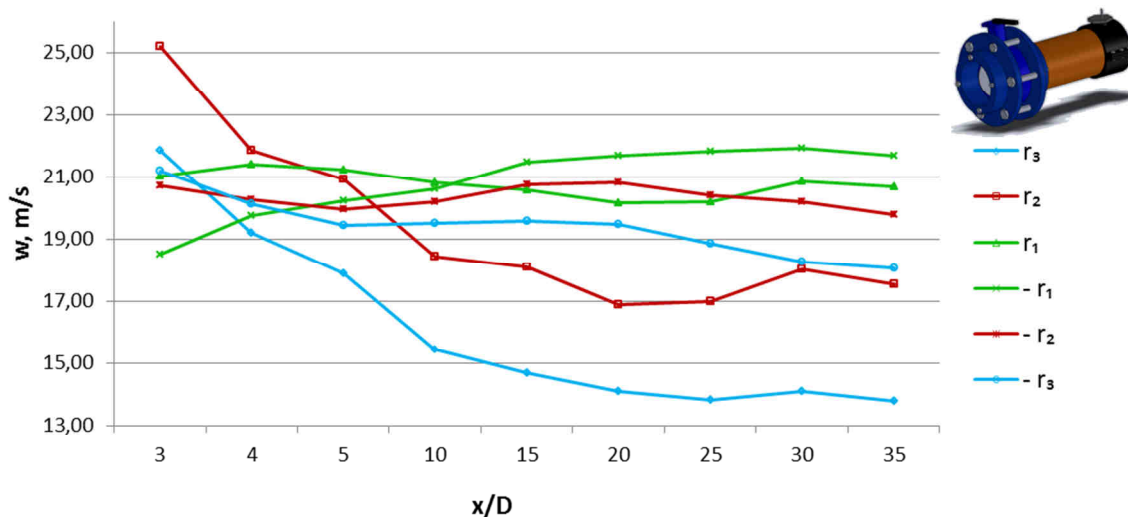


Rys. 98 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 18m/s oraz położenia pionowego sondy

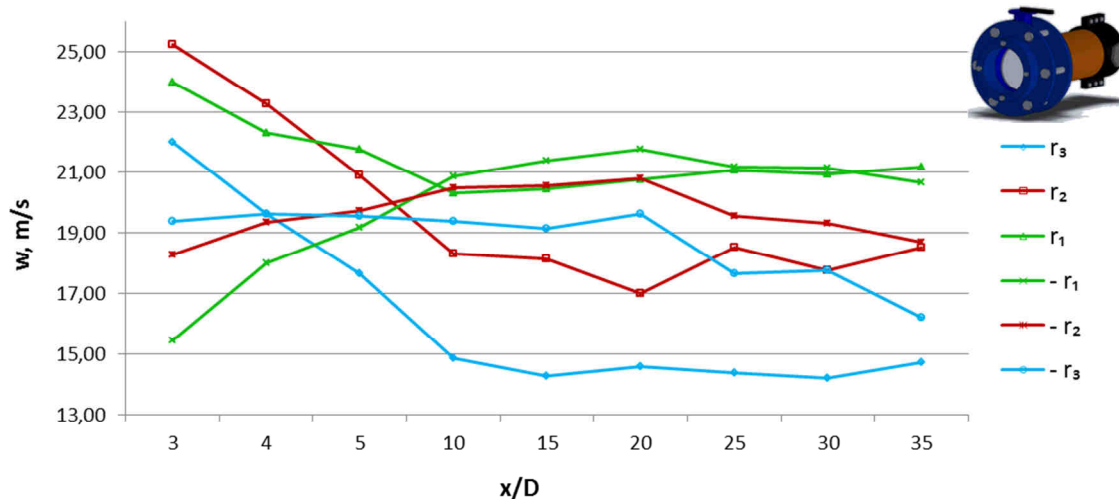


Rys. 99 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 26m/s oraz położenia pionowego sondy

Zarejestrowane prędkości lokalne z krokiem 2mm dały możliwość przeprowadzenia analizy prędkości, dla położenia odpowiadającym rozmieszczeniu otworków piezometrycznych w badanych konstrukcjach sond piętujących. Na rys. 47 przedstawiono rozmieszczenie otworków piezometrycznych w badanych konstrukcjach przepływomierzy. Na rys. 104÷105 podano wartości prędkości miejscowych w lokalizacjach odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych badanych przepływomierzy. Sondy umieszczano w położeniu pionowym oraz poziomym względem przepustnicy otwartej w 50%. Badania zrealizowano dla prędkości średniej 18m/s. Prędkości lokalne w poszczególnych parach otworków piezometrycznych wraz ze zwiększaniem odległości od elementu zaburzającego przyjmują zbliżone wartości, co świadczy o fakcie iż profil prędkości ulega stabilizacji. Wartości w skrajnych otworkach piezometrycznych (r_3 oraz $-r_3$) nie zbiegają się. Tutaj również przyczyną mogą być niewielkie zmiany w położeniu sondy w bliskiej odległości od ścianki rurociągu. Lokalizacja pozioma sondy względem przepustnicy otwartej w 50% jest metrologicznie korzystniejsza dla wszystkich analizowanych odległości od elementu zaburzającego, w przypadku rozpatrywanych prędkości lokalnych odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych w badanych konstrukcjach sond piętujących.



Rys. 100 Wartości prędkości miejscowych w lokalizacjach odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych badanych przepływomierzy, przepustnica otwarta w 50%, położenie pionowe, prędkość średnia 18m/s



Rys. 101 Wartości prędkości miejscowych w lokalizacjach odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych badanych przepływomierzy, przepustnica otwarta w 50%, położenie poziome, prędkość średnia 18m/s

W tabeli 9 zestawiono odchyłki współczynników przepływu $K_{\dot{sr}x/D}$ od $K_{\dot{sr}35}$ analizowanych sond piętrzących w różnych odległościach od elementu zaburzającego. Wartości $K_{\dot{sr}x/D}$ zostały uśrednione dla całego zakresu analizowanych prędkości (10÷30m/s- 93 punkty pomiarowe) a następnie odniesione do współczynnika przepływu wyznaczonego dla położenia, gdzie profil prędkości był w pełni rozwinięty. Dla układu zaburzającego w postaci przepustnicy otwartej w 50% $K_{\dot{sr}35}$ (10÷30m/s- 93 punkty pomiarowe) wyznaczono w odległości $x/D=35$. Zestawienie odchyłek $K_{\dot{sr}x/D}$ od $K_{\dot{sr}35}$ wykonano korzystając z zależności (15). Miejsca metrologicznie niekorzystne, dla których niepewność dodatkowa związana z lokalizacją czujnika δK_{lok} jest większe od $\pm 3,0\%$ w tabeli oznaczono kolorem czerwonym.

Tab. 9 Zestawienie niepewności dodatkowej związanej z lokalizacją czujnika δK_{lok} analizowanych sond piętrzących w różnych odległościach od przepustnicy otwartej w 50%

SONDA INTROBAR									
δK_{lok}	3D	4D	5D	10D	15D	20D	25D	30D	35D
Pion	-2,0%	-0,8%	-0,3%	-1,2%	-2,4%	-1,2%	-0,5%	-0,9%	0,0%
Poziom	2,4%	1,8%	1,4%	-0,4%	-1,4%	-2,5%	2,3%	-2,4%	0,0%
SONDA DWUPROFILOWA									
δK_{lok}	3D	4D	5D	10D	15D	20D	25D	30D	35D
Pion	-4,0%	-3,5%	1,8%	3,6%	1,8%	2,4%	5,5%	1,3%	0,0%
Poziom	2,2%	1,3%	0,1%	0,1%	1,3%	1,6%	1,9%	1,5%	0,0%
SONDA OPŁYWOWA ANNUBAR									
δK_{lok}	3D	4D	5D	10D	15D	20D	25D	30D	35D
Pion	1,3%	2,1%	4,1%	-0,4%	2,5%	-1,1%	-0,9%	-1,1%	0,0%
Poziom	5,0%	3,1%	0,3%	1,6%	2,8%	-1,1%	-3,3%	-1,1%	0,0%

Wyniki pomiarów i obliczeń zamieszczone w niniejszym rozdziale wskazują, że profil prędkości w bliskim sąsiedztwie za przepustnicą otwartą w 50% jest silnie zaburzony. Zaburzenie to ma charakter nieasymetryczny, szczególnie w zakresie 3÷10D. Powyżej 15D zaburzenie zanika. Zaburzenie to jednak nie powoduje znaczącego odchylenia współczynnika przepływu od wartości K_{35} w odniesieniu do przepływu niezaburzonego dla sondy Introbar. W przypadku sondy Introbar, odchyłka δK_{lok} nie przekracza w skrajnie niekorzystnym położeniu $\pm 3,0\%$. Większy jest zakres tych zmian w przypadku pozostałych analizowanych sond. Zakres tych zmian jest większy w przypadku położenia sondy Dwuprofilowej w pionie, gdzie zaburzenie profilu wpływa znacznie silniej. W przypadku poziomego położenie czujnika opływowego Annubar pomiary wykazały znaczne odchyłki wartości δK_{lok} w odległościach 3,4 a nawet 25D, gdzie nie zaleca się montażu sondy. Położenie pionowe sondy Annubar w odległości już 10D od przepustnicy otwartej w 50% daje wyniki odchyłki δK_{lok} nie większe jak $\pm 2,5\%$, co stanowi o możliwości jej wykorzystania w takiej konfiguracji rurociągu. Wyniki badań wskazują na odchyłkę współczynnika K sond Annubar oraz Dwuprofilowej przy umieszczeniu ich w odległości 25D od przepustnicy otwartej w 50%. Wskazuje to na brak możliwości stosowania tych sond w tym położeniu. Zagadnienie to wymaga dalszych badań. Zauważalny jest również wpływ wartości średniej prędkości na wartość współczynnika K. Dla przepustnicy otwartej w 50% spośród analizowanych kształtów sond, najlepsze wyniki metrologiczne daje sonda Introbar.

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Pomiary strumieni masy i objętości są jednymi z najczęściej realizowanych w przemyśle. W przypadku przepływów w kanałach o dużych średnicach ($D > 800\text{mm}$), zwłaszcza gdy przepływający czynnik ma wysoką temperaturę rzędu kilkuset °C, zastosowanie znalazły uśredniające sondy piętzące przepływ. Wielokrotnie, szczególnie w przypadku kanałów o dużych średnicach, są niedotrzymywane warunki instalacyjne co do odpowiednio długich prostych odcinków rurociągu przed i za przepływomierzem.

W pracy przeprowadzono badania dotyczące wpływu typowych elementów zaburzających przepływ na wartość współczynnika przepływu **trzech** rozwiązań konstrukcyjnych uśredniających sond piętzących przepływ. Przeprowadzone badania dotyczyły wpływu zaburzenia wywołanego kolanem segmentowym $3 \times 30^\circ$, układem kolan segmentowych w różnych płaszczyznach, oraz przepustnicą przy dwóch stopniach otwarcia na wartość współczynnika przepływu badanych przepływomierzy. Przeprowadzono badania dla trzech różnych prędkości powietrza, które wynosiły odpowiednio 10, 18, 26 m/s. Prędkość referencyjna wyznaczana była przy pomocy przepływomierza turbinowego o niepewności całkowitej $\pm 0,5\%$ wartości mierzonej w całym zakresie analizowanych prędkości. Badania przeprowadzono dla jednej średnicy rurociągu o średnicy wewnętrznej równej 152 mm i dla kilku ÷ kilkunastu odległości od elementu zaburzającego. Ponadto wyznaczono profile prędkości powietrza w celu dokonania szczegółowej analizy prędkości miejscowych.

Przeprowadzone badania, obliczenia oraz ich analiza pozwoliły na przedstawienie następujących wniosków:

- a) Wyznaczone profile prędkości z „krokiem” 2 mm dają możliwość szczegółowej analizy prędkości miejscowych płynu za elementem zaburzającym przepływ.
- b) Dla **kolana segmentowego $3 \times 30^\circ$** , profil prędkości w bliskim sąsiedztwie elementu zaburzającego jest silnie zdeformowany. Deformacja ta ma charakter asymetryczny i powoduje odchylenia współczynnika przepływu od wartości K_{20} dla przepływu niezaburzonego. Największy zakres tych zmian ma miejsce w przypadku sond *Annubar* ($\delta K_{lok} \pm 6\%$) oraz *Introbar* ($\delta K_{lok} \pm 4,5\%$) dla lokalizacji sond w płaszczyźnie kolana (pionowej). Najmniejszy zakres zmienności współczynnika K występuje dla sondy *Dwuprofilowej* ($\delta K_{lok} \pm 1,3\%$), oraz jej położenia poziomego względem układu zaburzającego.

- c) Dla **układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach**, profil prędkości za tymi elementami ma charakter asymetryczny. W przepływającym płynie powstają wiry, które mogą mieć wpływ na wartość pomiaru wielkości prędkości lokalnej. Tak duża deformacja profilu prędkości ma istotny wpływ na pomiar strumienia wszelkiego rodzaju przepływomierzami uśredniającymi ciśnienie dynamiczne. Powstałe zaburzenie strugi powoduje istotne odchylenia współczynnika przepływu od wartości K_{35} dla przepływu niezaburzonego. Największy zakres tych zmian ma miejsce w przypadku sond *Annubar* ($\delta K_{lok} \pm 9,1\%$) oraz *Introbar* ($\delta K_{lok} \pm 4,7\%$) dla lokalizacji sond w pionie. Najmniejszy zakres tych zmian występuje dla sondy *Dwuprofilowej* ($\delta K_{lok} \pm 2,7\%$), już przy umieszczeniu sondy odpowiadającej odległości 4D od elementu zaburzającego, dla obu położenia względem układu zaburzającego (pion, poziom).
- d) Za **przepustnicą w pełni otwartą**, profile prędkości wykazują asymetryczny rozkład prędkości miejscowych w pobliżu ścianki rurociągu, dla wszystkich analizowanych wartości prędkości średnich. Takie wyniki mogą być spowodowane przyjętą techniką pomiarową, ponieważ niewielkie zmiany w położeniu sondy w bliskiej odległości od ścianki rurociągu, gdzie występuje duże gradienty prędkości mogą być powodem znacznych rozbieżności wyników pomiarów prędkości lokalnych. Profil prędkości już we względnej odległości 10 średnic od elementu zaburzającego jest bliski profilowi, który przyjęto jako w pełni rozwinięty. Powstały rodzaj zaburzenia powoduje odchylenia współczynnika przepływu od wartości K_{35} dla przepływu niezaburzonego. Największy zakres tych zmian ma miejsce w przypadku sond *Annubar* ($\delta K_{lok} \pm 6,6\%$) oraz *Introbar* ($\delta K_{lok} \pm 6,4\%$), najmniejszy zakres tych zmian występuje dla sondy *Dwuprofilowej* ($\delta K_{lok} \pm 2,4\%$), już we względnej odległości odpowiadającej odległości 4D od elementu zaburzającego, dla pionowego położenia względem układu zaburzającego. Zagadnieniem wymagającym dodatkowych badań w tym numerycznych symulacji komputerowych, jest lokalizacja odpowiadająca odległości 25D od elementu zaburzającego, w której to niepewność dodatkowa związana z lokalizacją sondy zawiera się w granicach (δK_{lok} od $\pm 3,1\%$ do $\pm 4,5\%$) dla wszystkich analizowanych sond.

- e) Za **przepustnicą otwartą w 50%**, profile prędkości wykazują asymetryczny rozkład prędkości miejscowych dla wszystkich analizowanych wartości prędkości średnich. Pomimo znacznego zaburzenia strugi w niewielkich odległościach od przepustnicy, profil prędkości ulega szybkiej stabilizacji. Profil prędkości już we względnej odległości 10 średnic od elementu zaburzającego jest bliski profilowi który przyjęto jako w pełni rozwinięty. Podobnie jak dla przepustnicy w pełni otwartej, powstały rodzaj zaburzenia powoduje odchylenia współczynnika przepływu od wartości K_{35} dla przepływu niezaburzonego. Największy zakres tych zmian ma miejsce w przypadku sond *Dwuprofilowej* ($\delta K_{lok} \pm 5,5\%$) oraz *Annubar* ($\delta K_{lok} \pm 5,0\%$), najmniejszy zakres tych zmian występuje dla sondy *Introbar* ($\delta K_{lok} \pm 2,5\%$). Zagadnieniem wymagającym dodatkowych badań, w tym numerycznych symulacji komputerowych, jest lokalizacja odpowiadająca odległości 25D od elementu zaburzającego, w której to niepewność dodatkowa związana z lokalizacją sondy *Dwuprofilowej* oraz *Annubar* zawiera się w granicach (δK_{lok} od $\pm 3,3\%$ do $\pm 5,5\%$).
- f) Analiza przeprowadzonych badań wykazała, że możliwe jest wykorzystanie przepływomierzy piętrzących przepływ w odległościach znacznie mniejszych od zalecanych przez producentów.
- g) Niepewność całkowita na poziomie od $\pm 3,0\%$ do $\pm 4,0\%$ pozwala na wykorzystanie analizowanych przepływomierzy w szeregu systemach regulacji procesów technologicznych np. w sterowaniu procesem spalania.
- h) Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie zaleceń natury metrologicznej a otrzymane wyniki wykazały, że nie tylko odległość od elementu zaburzającego ale również płaszczyzna w jakiej jest umieszczony przepływomierz ma wpływ na niepewność pomiaru badanymi przepływomierzami.

8. LITERATURA

- [1] ACCUTUBE: Flow sensors. Dokumentacja techniczna.
- [2] ACUBAR czujnik przepływu: Dokumentacja techniczna. INTROL – Katowice 2002.
- [3] Bechtold Z.: O przyczynach niedokładności wyników pomiarów rozkładu prędkości i natężenia przepływu rurkami piętrzącymi. Prace Naukowe Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej Nr 15, Studia i Materiały Nr 11, Wrocław 1978, s. 25-34.
- [4] Branch J.C.: The effects on an upstream short radius elbow and pressure tap location on orifice discharge coefficients. Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 6, No.3, 1995, s.157-162.
- [5] Brandt Instruments, Inc.: DSK 1000 Series Air/Gas Flow Sensor, North Carolina, 1998.
- [6] Bukowski J., Kijowski P.: Kurs Mechaniki Płynów, PWN, Warszawa, 1980.
- [7] Bukowski J.: Mechanika Płynów, PWN, Warszawa, 1959.
- [8] Carlander C., Delsing J.: Installation effects on an ultrasonic flow meter with implications for self diagnostics. Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 11, No.2, 2000, s.109-122.
- [9] Chmielniak T., Kotowicz J., Węcel D.: Experimental and numerical investigations of the averaging Pitot tube and analysis of installation effects on the flow coefficient. Flow Measurement and Instrumentation, No.19, March 2008, s.301-306.
- [10] Chruściel M.: Lab VIEW w praktyce, Wydawnictwo BTC, Legionowo, 2008.
- [11] Dobrowolski B., Kabaciński M., Pospolita J.: A mathematical model of the self-averaging Pitot tube. A mathematical model of a flow sensor. Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 16, February 2005, s. 251-265.
- [12] Duckworth R.A.: Mechanika płynów, WNT, Warszawa, 1983.
- [13] Ellipse Flow Sensor: Materiały informacyjne firmy Preso, 2008.
- [14] Elsner J. W., Drobnik S.: Aktualne tendencje rozwoju współczesnej metrologii turbulencji. Materiały konferencyjne, tom 1, Częstochowa, 1996, s. 143÷149.
- [15] Elsner J.W.: Turbulencja przepływów. PWN, Warszawa, 1987.
- [16] Fletcher S.I., Nicholson I.G., Smith D.J.M.: An investigation into the effects of installation on the performance of insertion flowmeters. Flow Measurement and Instrumentation, Vol.11, No.1, March 2000, s.19-39.
- [17] Fotowicz P.: Historyczne źródła teorii błędu i niepewności pomiaru. Pomiary Automatyka Robotyka, nr 7-8, 2012, s. 72-75.
- [18] Fotowicz P.: Nowe podejście w dziedzinie wyrażania niepewności pomiaru. Pomiary Automatyka Robotyka, nr 7-8, 2006, s. 34-37.
- [19] Fotowicz P.: Obliczanie niepewności pomiaru zgodne z definicją przedziału rozszerzenia na przykładzie opracowania wyniku wzorcowania mikrometru. Pomiary Automatyka Robotyka, nr 10, 2010, s. 48-52.

- [20] Fotowicz P.: Obliczanie niepewności rozszerzonej metodą analityczną opartą na splocie rozkładów wielkości wejściowych. *Pomiary Automatyka Robotyka*, nr 1, 2005, s. 5-9.
- [21] Gilmont R.: Velocity Profile of Turbulent Flow in Smooth Circular Pipes. *Measurements & Control*, Issue 177, June 1996, s. 96-103.
- [22] Gondek A.: Analiza teoretyczno – doświadczalna pomiaru strumienia objętości płynu przy zastosowaniu sondy uśredniającej w przewodzie o przekroju prostokątnym. Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Monografia 260, Kraków 1999.
- [23] Gondek A.: Badanie wpływu parametrów konstrukcyjno-przepływowych na dokładność pomiaru wydatku sondą uśredniającą w przewodzie prostokątnym. Projekt badawczy nr 8T10B03414.
- [24] Gondek A.: Metrologiczne własności sondy uśredniającej związane z przyjętym modelem przepływu. *Archiwum Energetyki*, tom XXIX, nr 3-4, 2000, s. 3-16.
- [25] Gondek A.: Model matematyczny przepływu oraz jego wykorzystanie w przepływomierzach z rurkami uśredniającymi. *Metrologia i Systemy Pomiarowe*, tom VII, zeszyt 2, 2000, s. 163-175.
- [26] Gondek A.: Symulacja przepływu czynnika przez sondę przepływomierza zainstalowaną w kanale o przekroju prostokątnym. *Metrologia i Systemy Pomiarowe*, tom VII, zeszyt 2, 2000, s. 151-162.
- [27] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, International Organization for Standardization. 1993, 1995 (korekta oraz ponowne wydanie).
- [28] Hickman W. H.: Annubar properties investigation. *Proceedings of ISA's Industry Oriented Conference and Exhibit*, Milwaukee, vol. 30, (1-14), 1975, s. 708.
- [29] HONEYWELL: Katalog produktów. Dokumentacja techniczna, 2008.
- [30] INTROBAR: Przepływomierze z rurkami uśredniającymi ciśnienie dynamiczne. Dokumentacja techniczna, Opole, 2000.
- [31] INTROL: Katalog firmowy, aparatura kontrolno – pomiarowa. Katowice, 2000.
- [32] ITABAR: Flow Sensor for Gases, Steam and Liquids. Dokumentacja techniczna, Intra-Automation GmbH, 2011.
- [33] Jelonek J., Waluś S.: Właściwości metrologiczne uśredniających rurek spiętrzających. *PAK* nr 10/1983, s. 329-330.
- [34] Jeżowiecka- Kabsch K., Szewczyk H.: *Mechanika płynów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2001.
- [35] Kabaciński M., Kabza Z., Pospolita J.: Stanowisko laboratoryjne do badań przepływomierzy. *Pomiary Automatyka Robotyka*, nr 10, 2010, s. 53-57.
- [36] Kabacinski M., Lachowicz C., Pospolita J.: Analysis of Flowing Fluid Effect on Flow Averaging Tube. *TASK Quarterly*, Nr 3, Gdańsk, Maj 2008, s.217–226.
- [37] Kabaciński M., Pawliczek R.: Fully automated system for air velocity profile measurement. *The Archive of Mechanical Engineering*, vol. LIX, 2012, s. 435-451.
- [38] Kabaciński M.: Numeryczna i eksperymentalna ocena własności metrologicznych nowych rozwiązań piętrzących czujników przepływu. Praca doktorska, Politechnika Opolska, Opole 2004.

- [39] Kabza Z.: O niepewności pomiaru strumienia objętości cieczy rurkami uśredniającymi. Zeszyty Naukowe WSI w Opolu, nr 194, Elektryka z. 37, Opole, 1993.
- [40] Kateusz P.: Badania wpływu turbulencji strugi gazu na dokładność pomiaru prędkości różnicowymi sondami ciśnieniowymi. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2000.
- [41] Kotowicz J., Wiciak G., Węcel D.: Pomiar strumienia – wybrane zagadnienia badań eksperymentalnych i modelowania. Napędy i Sterowanie, R.8, nr 5, 2006, s.104-111.
- [42] Kotowicz J., Wiciak G.: Pomiar w nietypowych warunkach przepływu. Napędy i Sterowanie, R.9, nr 4, 2007, s.103-105.
- [43] Kotowicz J., Wiciak G.: Przepływomierze i ich właściwości w kontekście utrzymania ruchu. Napędy i Sterowanie, R.8, nr 11, 2006, s.106-108.
- [44] Król J.: Analiza metrologiczna przepływomierzy z rurkami uśredniającymi na podstawie modelu przepływu. Praca doktorska, Akademia Górniczo - Hutnicza w Krakowie, 2003.
- [45] Lajos T., Preszler L., Blachó M.: The estimation of the error at the flow rate measurement by Pitot-static tube. Flow Measurement of Fluids, 1978.
- [46] Laws E. M., Ouazzane A. K.: A preliminary study into the effect of length on the performance of the Etoile flow straightener. Flow Measurement and Instrumentation, Volume 6, Issue 3, 1995, s. 225–233.
- [47] Maciążek A.: Pomiary, Opady Atmosferyczne. Gazeta obserwatora IMGW, Nr 5, Październik 2005, s.18-23.
- [48] Materiały informacyjne firmy Fabryka Armatur JAFAR S.A.: Przepustnica miedzykołnierzowa 4497, Karta katalogowa, 2013.
- [49] Materiały informacyjne firmy National Instruments: Specyfikacja techniczna oraz instrukcja obsługi karty NI 9217, 2008.
- [50] Materiały informacyjne firmy National Instruments, Specyfikacja techniczna oraz instrukcja obsługi karty NI 9203, 2008.
- [51] Materiały informacyjne firmy National Instruments: Specyfikacja techniczna oraz instrukcja obsługi karty NI 9265, 2008.
- [52] Materiały informacyjne firmy National Instruments: Specyfikacja techniczna oraz instrukcja obsługi karty NI 9205, 2008.
- [53] Materiały informacyjne firmy National Instruments: Specyfikacja techniczna oraz instrukcja obsługi karty NI 9403, 2008.
- [54] Materiały informacyjne firmy WAVIN: Kanalizacja zewnętrzna z PVC-U, Katalog produktów, 2013.
- [55] Miao J.J., Wu C.W., Hu C.C., Chou J.H.: A study on signal quality of vortex flowmeter downstream of two elbows out-of-plane. Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 13, No.3, June 2002, s.75-85.
- [56] Mickan B., Wendt G., Kramer R., Dopheide D.: Systematic investigation of pipe flows and installation effects using laser Doppler anemometry – Part II. The effect of disturbed flow profiles on turbine gas meter – a describing empirical model. Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 7, No.3/4, September 1996, s.151-160.

- [57] Miller R. W.: Flow measurement engineering handbook. Mc Graw Hill Book Company, 1983.
- [58] Morrison G. L., Hall K. R., Holste J. C., Ihfe L., Gaharan C., DeOtte R. E., Jr.: Flow development downstream of a standard tube bundle and three different porous plate flow conditioners. Flow Measurement and Instrumentation, Volume 8, Issue 2, 1998, s. 61-76.
- [59] Parzybut M.: Projekt studialny tunelu aerodynamicznego. Praca Magisterska, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Opole 1996.
- [60] Peek Measurement, SSK1000 Series Insertion Air / Gas Flow Sensor, Brandt Instruments, Inc., 1996.
- [61] PN-82/M-42368: Pomiary przepływu płynu. Zasady obliczania niepewności wyników pomiarów pośrednich, WN, Warszawa 1982.
- [62] PN-93/M-53950/01: Pomiar strumienia masy i strumienia objętości płynów za pomocą zwęzek pomiarowych. Wydawnictwo Normalizacyjne Alfa, Warszawa 1994.
- [63] PN-EN ISO 5167-1:2005: Pomiary strumienia płynu za pomocą zwęzek pomiarowych wbudowanych w całkowicie wypełnione rurociągi o przekroju kołowym. Część 1: Zasady i wymagania ogólne, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2005.
- [64] PN-ISO 7066-2: Ocena niepewności podczas wzorcowania i użytkowania urządzeń do pomiaru strumienia płynu. Zależności podczas wzorcowania nieliniowego, marzec 1996.
- [65] Pospolita J., i inni: Przepływomierz z czujnikiem uśredniającym ciśnienie dynamiczne. Projekt Badawczy Rozwojowy PBR 0504/R/2/T02/07/02, Politechnika Opolska, 2009.
- [66] Pospolita J.: Pomiary strumieni płynów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole, 2004.
- [67] Prabu S.V., Mascomani R., Balakrishnan K., Konnur M.S.: Effects of upstream pipe fittings on the performance of orifice and conical flowmeters. Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 7, No.1, March 1996, s.49-54.
- [68] Przepływomierze Annubar. Karta katalogowa. Rosemount, Emerson Process Management, Warszawa 2002.
- [69] Ruppel C., Peters F.: Effects of upstream installation on the reading of an ultrasonic flowmeter. Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 15, No.3, June 2004, s.167-177.
- [70] Rurki spiętrzające Twin- Bar, Informacja techniczno- aplikacyjna, Zakłady Remontowe Energetyki Katowice S.A., Jaworzno 2007.
- [71] Rybnicki C., S Łuszczynski S.: Pomiary natężenia przepływu. Wiertnictwo, Nafta, Gaz, Tom 24, zeszyt 2, 2007, s. 835-856.
- [72] Spearman E. P., Sattary J. A., Reader-Harris M. J.: Comparison of velocity and turbulence profiles downstream of perforated plate flow conditioners. Flow Measurement and Instrumentation, Volume 7, Issues 3-4, 1996, s. 181-199.
- [73] Spitzer D.W.: Flow Measurement. Practical Guides for Measurement and Control, Instrument Society of America, United States of America, January 1996.

- [74] Staszek J.: Aerodynamika modeli latających. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1983.
- [75] Strohrmann G.: Automatisierungstechnische, vol. 36, 1994, str. 9-29.
- [76] TORBAR: przepływomierze z rurką uśredniającą ciśnienie dynamiczne. Dokumentacja techniczna, ABB – USA, 2013.
- [77] Troskoleński A.T.: Hydrometry, Theory and practice of hydraulic measurements. PWT, Warszawa, 1960.
- [78] Turzeniecka D.: Ocena niepewności wyniku pomiarów. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997.
- [79] VERIS VERABAR: Dokumentacja techniczna, 2006.
- [80] Waluś S., Czeszczyk G.: Wyznaczanie niektórych parametrów uśredniających rurek spiętrzających na podstawie badań doświadczalnych i modelowania matematycznego. Joint IMEKO TC-1 & XXXIV MKM Conference 2002, Wrocław, 8-12 września 2002, Vol. II. Materiały MKM, Politechnika Wrocławska, s. 127-134.
- [81] Waluś S., Wawrzynek J.: Dobór parametrów konstrukcyjnych uśredniających rurek spiętrzających. Konferencja naukowo-techniczna „Pomiary przepływów i poziomów w energetyce”, Ślesin 16-18 IV 1986. Koła SEP przy: Zakładach Pomiarowo-Badawczych Energetyki ENERGOPOMIAR - Gliwice, Zespole Elektrowni Pątnów-Adamów-Konin, 1986, s. 45-59.
- [82] Waluś S.: Decreasing of volume flow-rate measurement error in modified averaging impact tubes. FLOMEKO 2000 International Conference on Flow Measurement, Salvador, Brazil, June 4* - 8* 2000, FLOMEKO 2000 CD-ROM, paper No B2.
- [83] Waluś S.: Możliwość wykorzystania wybranych nowoczesnych przepływomierzy w układach automatyki. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 772, seria: Automatyka z. 71, Gliwice 1983, s. 165-173.
- [84] Waluś S.: Optymalizacja metrologiczna pomiaru strumienia płynu za pomocą przepływomierzy próbkujących. Monografia, Politechnika Śląska, Gliwice 2003.
- [85] Waluś S.: Procedury opracowania wyników pomiaru przepływu. XXVIII MKM, 22-25 września 1996, Częstochowa, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Konferencje 13, Materiały Konferencyjne, tom 2, Częstochowa, 1996, s. 289-294.
- [86] Waluś S.: Przepływomierze ultradźwiękowe, metodyka stosowania. Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1997.
- [87] Waluś S.: Przyczynek do doboru rozmieszczenia otworów piezometrycznych w uśredniających rurkach spiętrzających. XXVIII MKM, Zielona Góra, 21-23 IX 1995, Materiały Konferencyjne, Tom 2. WSI w Zielonej Górze, Zielona Góra, 1995, s. 419-426.
- [88] Waluś S.: Przyczynek do modelu matematycznego rurki uśredniającej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 772, seria Automatyka nr 71, Gliwice 1983, s. 155-163.
- [89] Waluś S.: The Mathematical Modelling of the Velocity Distribution in Closed Conduits. Proceedings of the 8th International Conference on Flow Measurement FLOMEKO'96, 1996, Beijing - China, Edited by Zhang Bayou, Han Lide, Zhao Xiaona, Standard Press of China, Beijing 1996, s. 474-479.

- [90] Węcel D., Chmielniak T.: Determination of the Flowmeters Characteristics Based on Computational Fluid Dynamics. Zeszyty Naukowe. Ciepne Maszyny Przepływowe – Turbomachinery- Politechnika Łódzka, nr 128, vol. 2, 2005, s.565-572.
- [91] Węcel D.: Analiza wpływu zaburzeń przepływu na dokładność pomiaru strumienia płynu w rurociągach. Archiwum Energetyki, Tom XXXVII, Nr 1-2, s.33-52.
- [92] Węcel D.: Analiza wpływu zaburzeń przepływu na dokładność pomiaru strumienia płynu w rurociągach. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 2006.
- [93] Węcel D.: Stanowisko do badania przepływomierzy – wybrane wyniki pomiarów. Rynek Energii, Nr 4, 2006, s. 25-31.
- [94] Węcel D.: Wykorzystanie numerycznej mechaniki płynów do rozwiązywania problemów związanych z pomiarem strumienia masy w zaburzonym przepływie. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej- 8 Konferencja. Problemy Badawcze Energetyki Ciepłej, T. 2, z. 25, 2007, s. 669-677.
- [95] Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik, Główny Urząd Miar, Warszawa, 1999.
- [96] Wysocki J.: Mechanika płynów. PWN, Warszawa, 1967.
- [97] Zimmermann H.: Examination of disturbed pipe flow and its effects on flow measurement using orifice plates. Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 10, No.4, December 1999, s.223-240.
- [98] Пешехонов Ф.: Приборы для измерения давления, температуры и направления потока в компрессорах. Оборонгиз, Moskwa, 1962 [j. rosyjski].
- [99] Петунин А. Н.: Методы и техника измерений параметров газового потока. Машиностроение, Moskwa, 1996 [j. rosyjski].

9. SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1 Odbiór ciśnień w przepływomierzu z rurką uśredniającą ciśnienie dynamiczne.....	9
Rys. 2 Obszary wysokiego oraz niskiego ciśnienia tworzące się podczas opływu przepływomierza z rurką uśredniającą ciśnienie dynamiczne.....	10
Rys. 3 Budowa oryginalnej rurki Pitota	15
Rys. 4 Budowa rurki Darcy-ego	16
Rys. 5 Wybrane konstrukcje sond do pomiaru ciśnienia całkowitego	17
Rys. 6 Stosunek prędkości mierzonej za pomocą rurki spiętrzającej do prędkości średniej w rurociągu dla różnej liczby otworków: a) 1 otwór, b) 2 otwory, c) 4 otwory, d) 6 otworów	19
Rys. 7 Przekroje komór uśredniających sond piętrzących: a) Honeywell, b) Introbar, c) Accubar, d) Twin- Bar ,e) Veris- Verabar, Torbar , g) cyrkulacja czynnika wewnątrz komory uśredniającej (p^+) rurki spiętrzającej.....	21
Rys. 8 Rozkłady prędkości i ciśnień wewnątrz sondy o przekroju kołowym	22
Rys. 9 Zmiana współczynnika przepływu ΔK w funkcji odległości za: a) kolaniem, b) dwoma kolanami w jednej płaszczyźnie, c) dwoma kolanami w dwóch płaszczyznach	31
Rys. 10 Idea konstrukcji sondy firmy Peek Measurement	32
Rys. 11 Przykładowe systemy montażu czujnika przepływomierza spiętrzającego ciśnienie: a) mocowanie dławikowe, b) przez zawór kulowy (WET-TAP)	33
Rys. 12 Schemat stanowiska pomiarowego- rzut z góry.....	36
Rys. 13 Widok ogólny stanowiska pomiarowego po modyfikacji.....	37
Rys. 14 Tunel aerodynamiczny	37
Rys. 15 Sekcja rurociągów przed modyfikacją.....	38
Rys. 16 Zespół wymuszający przepływ- silnik trójfazowy wraz z dmuchawą odśrodkową.....	38
Rys. 17 Przetwornica częstotliwości firmy Danfoss typu VLT HVAC Drive FC 102.....	39
Rys. 18 Układ pomiarowy do trawersowania przestrzeni pomiarowej.....	40
Rys. 19 Przetworniki różnicy ciśnień SIEMENS SITRANS DS III wraz z trójdrogowymi blokami zaworów firmy SCHNEIDER (2kPa, 6kPa i 25kPa).....	40
Rys. 20 Przetwornik ciśnienia absolutnego WIKA typu P-10	41
Rys. 21 Termometr oporowy Pt-100 zainstalowany w rurociągu	41
Rys. 22 Przepływomierze turbinowe firmy SPONSLER wraz ze wzmacniaczami impulsów	42
Rys. 23 Barometr LB-716 (a) i higrometr (b)	42
Rys. 24 Karty pomiarowe w systemie CompactDAQ firmy National Instruments	43
Rys. 25 Oprogramowanie do akwizycji danych- profile prędkości	44
Rys. 26 Pomiar odległości pomiędzy wyłącznikami krańcowymi.....	45
Rys. 27 Oprogramowanie do akwizycji danych – wyznaczanie współczynnika przepływu K.....	46
Rys. 28 Przekształcanie sygnału surowego na jednostki docelowe dla rurki Prandtla	46
Rys. 29 Charakterystyczne wymiary analizowanego kolana	51
Rys. 30 Charakterystyczne wymiary analizowanej przepustnicy	52

Rys. 31 Profile prędkości w odległościach 3D, 4D, 5D, 7D, 20D od elementu zaburzającego w postaci kolana segmentowego 3x30°, położenie pionowe sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a)10,00 m/s, b)18,00 m/s, c)26,00m/s.....	54
Rys. 32 Profile prędkości w odległościach 3D, 4D, 5D, 7D, 20D od elementu zaburzającego w postaci kolana segmentowego 3x30°, położenie poziome sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a)10,00 m/s, b)18,00 m/s, c)26,00m/s.....	55
Rys. 33 Profile prędkości w odległościach 9D, 12D, 15D, 20D od elementu zaburzającego w postaci kolana segmentowego 3x30°, położenie pionowe sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a)10,00 m/s, b)18,00 m/s, c)26,00m/s.....	56
Rys. 34 Profile prędkości w odległościach 3D, 4D, 5D, 7D, 20D od elementu zaburzającego w postaci kolana segmentowego 3x30°, położenie poziome sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a)10,00 m/s, b)18,00 m/s, c)26,00m/s.....	57
Rys. 35 Współczynniki przepływu K/K_{20} przepływomierza Introbar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy	59
Rys. 36 Współczynniki przepływu K/K_{20} przepływomierza Introbar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy	60
Rys. 37 Współczynniki przepływu K/K_{20} przepływomierza Accubar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy	60
Rys. 38 Współczynniki przepływu K/K_{20} przepływomierza Accubar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy	61
Rys. 39 Współczynniki przepływu K/K_{20} przepływomierza Dwuprofilowego w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy.....	61
Rys. 40 Współczynniki przepływu K/K_{20} przepływomierza Dwuprofilowego w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy.....	62
Rys. 41 Współczynniki przepływu K/K_{20} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 10m/s oraz położenia poziomego sondy	62
Rys. 42 Współczynniki przepływu K/K_{20} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 18m/s oraz położenia poziomego sondy	63
Rys. 43 Współczynniki przepływu K/K_{20} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 26m/s oraz położenia poziomego sondy	63
Rys. 44 Współczynniki przepływu K/K_{20} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 10m/s oraz położenia pionowego sondy	64
Rys. 45 Współczynniki przepływu K/K_{20} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 18m/s oraz położenia pionowego sondy	64
Rys. 46 Współczynniki przepływu K/K_{20} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 26m/s oraz położenia pionowego sondy	65
Rys. 47 Rozmieszczenie otworków piezometrycznych w badanych konstrukcjach przepływomierzy	65
Rys. 48 Wartości prędkości miejscowych w lokalizacjach odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych badanych przepływomierzy, dla kolana segmentowego 3x30°, położenie pionowe, prędkość średnia 18m/s	66
Rys. 49 Wartości prędkości miejscowych w lokalizacjach odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych badanych przepływomierzy, dla kolana segmentowego 3x30°, położenie poziome, prędkość średnia 18m/s	66
Rys. 50 Profile prędkości w odległościach 3D, 4D, 5D, 7D, 35D od elementu zaburzającego w postaci układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach, położenie	

pionowe sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a)10,00 m/s, b)18,00 m/s, c)26,00m/s	70
Rys. 51 Profile prędkości w odległościach 3D, 4D, 5D, 7D, 35D od elementu zaburzającego w postaci układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach, położenie poziome sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a)10,00 m/s, b)18,00 m/s, c)26,00m/s	71
Rys. 52 Profile prędkości w odległościach 9D, 12D, 15D, 20D, 35D od elementu zaburzającego w postaci układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach, położenie pionowe sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a)10,00 m/s, b)18,00 m/s, c)26,00m/s	72
Rys. 53 Profile prędkości w odległościach 9D, 12D, 15D, 20D, 35D od elementu zaburzającego w postaci układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach, położenie poziome sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a)10,00 m/s, b)18,00 m/s, c)26,00m/s	73
Rys. 54 Profile prędkości w odległościach 22D, 25D, 30D, 35D od elementu zaburzającego w postaci układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach, położenie pionowe sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a)10,00 m/s, b)18,00 m/s, c)26,00m/s	74
Rys. 55 Profile prędkości w odległościach 22D, 25D, 30D, 35D od elementu zaburzającego w postaci układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach, położenie poziome sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a)10,00 m/s, b)18,00 m/s, c)26,00m/s	75
Rys. 56 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Introbar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy	76
Rys. 57 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Introbar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy	77
Rys. 58 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Accubar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy	77
Rys. 59 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Accubar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy	78
Rys. 60 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Dwuprofilowego w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy.....	78
Rys. 61 Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Dwuprofilowego w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy.....	79
Rys. 62 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 10m/s oraz położenia poziomego sondy	79
Rys. 63 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 18m/s oraz położenia poziomego sondy	80
Rys. 64 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 26m/s oraz położenia poziomego sondy	80
Rys. 65 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 10m/s oraz położenia pionowego sondy	81
Rys. 66 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 18m/s oraz położenia pionowego sondy	81
Rys. 67 Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 26m/s oraz położenia pionowego sondy	82

Rys. 68	Wartości prędkości miejscowych w lokalizacjach odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych badanych przepływomierzy, dla układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach, położenie pionowe, prędkość średnia 18m/s.....	83
Rys. 69	Wartości prędkości miejscowych w lokalizacjach odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych badanych przepływomierzy, dla układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach, położenie poziome, prędkość średnia 18m/s.....	83
Rys. 70	Profile prędkości w odległościach 3D, 4D, 5D, 10D, 35D od elementu zaburzającego w postaci przepustnicy w pełni otwartej, położenie pionowe sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a)10,00 m/s, b)18,00 m/s, c)26,00m/s.....	87
Rys. 71	Profile prędkości w odległościach 3D, 4D, 5D, 10D, 35D od elementu zaburzającego w postaci przepustnicy w pełni otwartej, położenie poziome sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a)10,00 m/s, b)18,00 m/s, c)26,00m/s.....	88
Rys. 72	Profile prędkości w odległościach 15D, 20D, 25D, 30D, 35D od elementu zaburzającego w postaci przepustnicy w pełni otwartej, położenie pionowe sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a)10,00m/s, b)18,00m/s, c)26,00m/s	89
Rys. 73	Profile prędkości w odległościach 15D, 20D, 25D, 30D, 35D od elementu zaburzającego w postaci przepustnicy w pełni otwartej, położenie poziome sondy, wyznaczone dla trzech prędkości średnich: a)10,00m/s, b)18,00m/s, c)26,00m/s	90
Rys. 74	Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Introbar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy	91
Rys. 75	Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Introbar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy	92
Rys. 76	Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Accubar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy	92
Rys. 77	Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Accubar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy	93
Rys. 78	Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Dwuprofilowego w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy.....	93
Rys. 79	Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Dwuprofilowego w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy.....	94
Rys. 80	Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 10m/s oraz położenia poziomego sondy.....	94
Rys. 81	Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 18m/s oraz położenia poziomego sondy.....	95
Rys. 82	Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 26m/s oraz położenia poziomego sondy.....	95
Rys. 83	Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 10m/s oraz położenia pionowego sondy.....	96
Rys. 84	Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 18m/s oraz położenia pionowego sondy.....	96
Rys. 85	Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 26m/s oraz położenia pionowego sondy.....	97

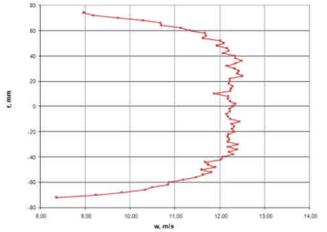
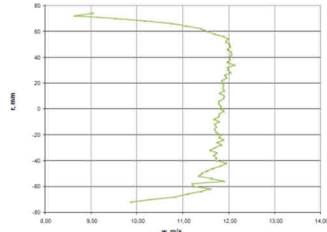
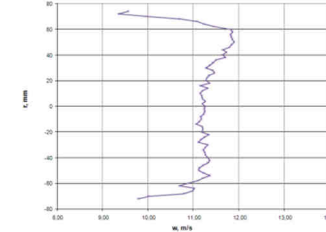
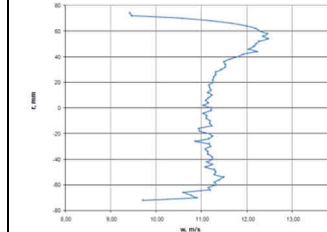
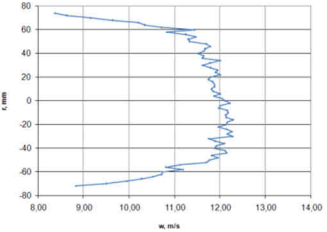
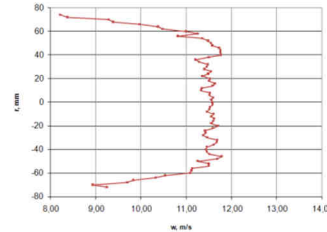
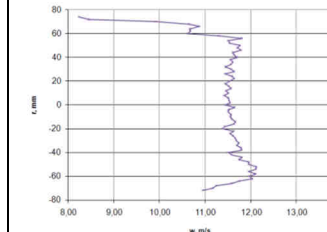
Rys. 86	Wartości prędkości miejscowych w lokalizacjach odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych badanych przepływomierzy, przepustnica w pełni otwarta, położenie pionowe, prędkość średnia 18m/s	98
Rys. 87	Wartości prędkości miejscowych w lokalizacjach odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych badanych przepływomierzy, przepustnica w pełni otwarta, położenie poziome, prędkość średnia 18m/s	98
Rys. 88	Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Introbar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy	106
Rys. 89	Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Introbar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy	107
Rys. 90	Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Accubar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy	107
Rys. 91	Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Accubar w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy	108
Rys. 92	Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Dwuprofilowego w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia pionowego sondy.....	108
Rys. 93	Współczynniki przepływu K/K_{35} przepływomierza Dwuprofilowego w funkcji odległości od układu zaburzającego, dla położenia poziomego sondy.....	109
Rys. 94	Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 10m/s oraz położenia poziomego sondy	109
Rys. 95	Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 18m/s oraz położenia poziomego sondy	110
Rys. 96	Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 26m/s oraz położenia poziomego sondy	110
Rys. 97	Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 10m/s oraz położenia pionowego sondy	111
Rys. 98	Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 18m/s oraz położenia pionowego sondy	111
Rys. 99	Współczynniki przepływu K/K_{35} badanych przepływomierzy, przy prędkości średniej 26m/s oraz położenia pionowego sondy	112
Rys. 100	Wartości prędkości miejscowych w lokalizacjach odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych badanych przepływomierzy, przepustnica otwarta w 50%, położenie pionowe, prędkość średnia 18m/s	113
Rys. 101	Wartości prędkości miejscowych w lokalizacjach odpowiadających rozmieszczeniu otworków piezometrycznych badanych przepływomierzy, przepustnica otwarta w 50%, położenie poziome, prędkość średnia 18m/s	113

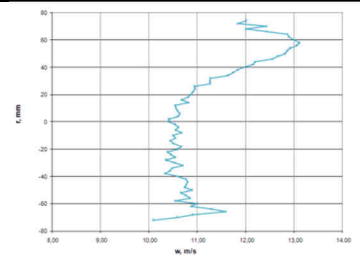
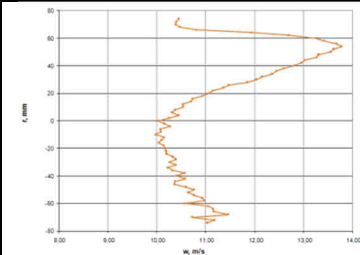
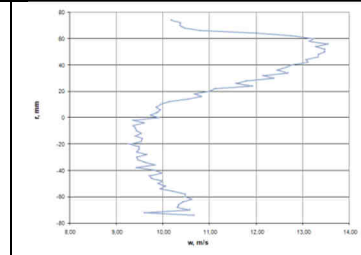
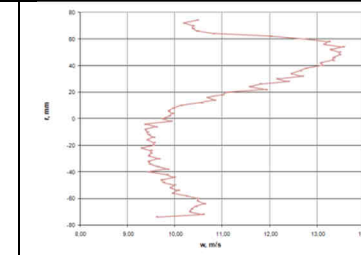
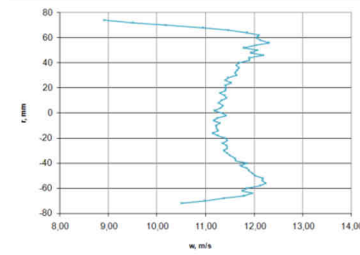
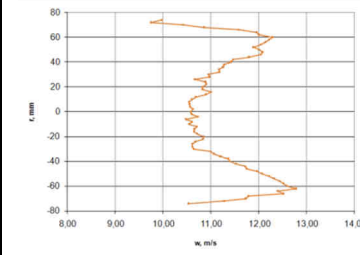
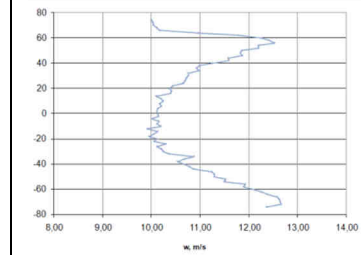
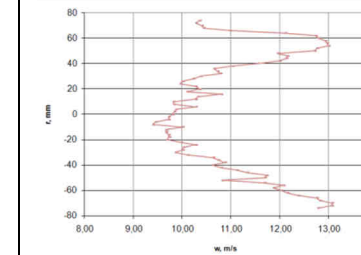
10. SPIS TABEL

Tab. 1 Wybrane przekroje poprzeczne czujników uśredniających ciśnienie dynamiczne	12
Tab. 2 Wybrane typy czujników uśredniających ciśnienie dynamiczne oraz odległości przed i za typowymi elementami zaburzającymi przepływ.	24
Tab. 3 Wymiary i tolerancje wymiarów rurociągów.....	49
Tab. 4 Wykaz urządzeń wykorzystywanych podczas badań.....	50
Tab. 5 Zestawienie analizowanych wariantów konfiguracji instalacji.....	52
Tab. 6 Zestawienie niepewności dodatkowej związanej z lokalizacją czujnika δK_{lok} analizowanych sond piętrzących w różnych odległościach od kolana segmentowego $3 \times 30^\circ$	67
Tab. 7 Zestawienie niepewności dodatkowej związanej z lokalizacją czujnika δK_{lok} analizowanych sond piętrzących w różnych odległościach od układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach.....	84
Tab. 8 Zestawienie niepewności dodatkowej związanej z lokalizacją czujnika δK_{lok} analizowanych sond piętrzących w różnych odległościach od przepustnicy w pełni otwartej	99
Tab. 9 Zestawienie niepewności dodatkowej związanej z lokalizacją czujnika δK_{lok} analizowanych sond piętrzących w różnych odległościach od przepustnicy otwartej w 50%	114

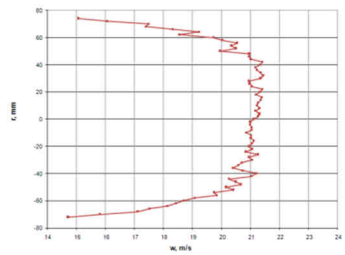
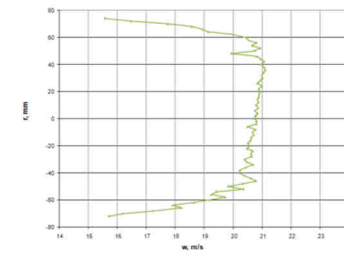
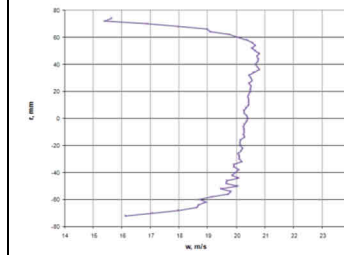
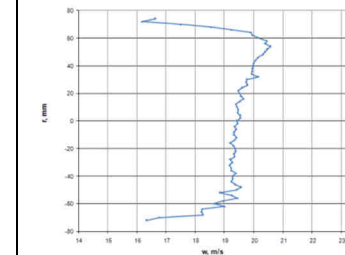
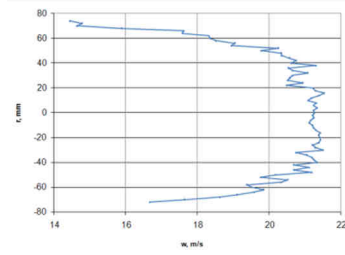
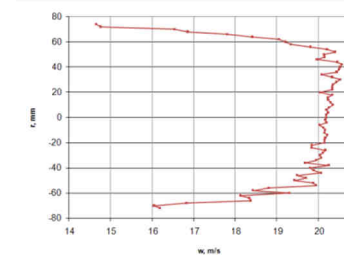
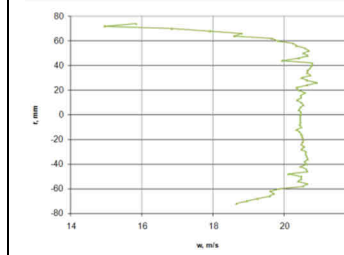
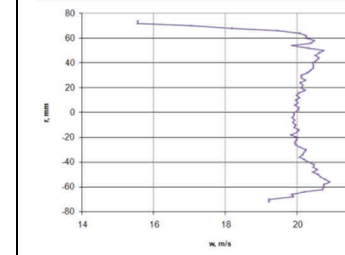
Załącznik 1

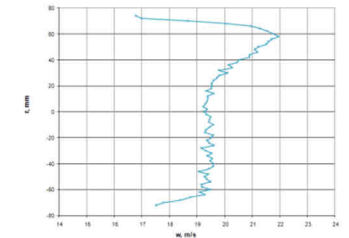
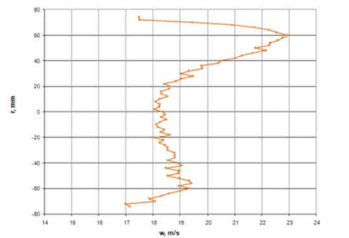
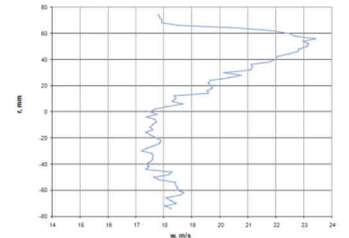
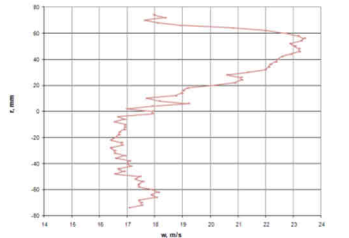
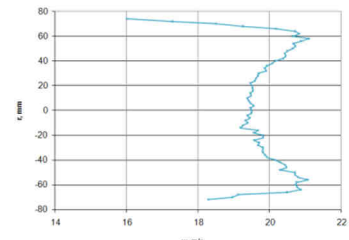
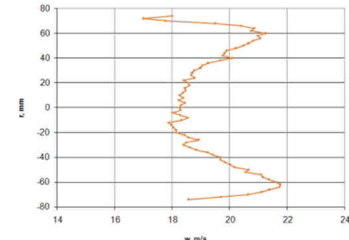
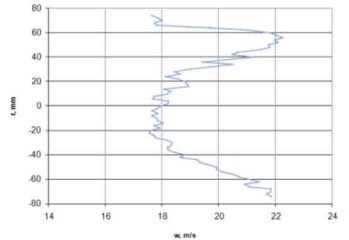
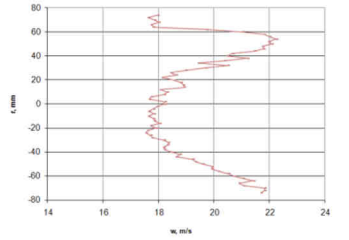
Tab.10 1-1 Zestawienie danych pomiarowych za układem zaburzającym w postaci kolana segmentowego 3x30°

		10m/s			
		20	15	12	9
PION	Wielokrotność D				
	Profil prędkości				
	$w_{\text{śr}}$	10,16	10,17	10,21	10,16
	w_{max}	12,10	12,30	12,12	11,90
	w_{min}	11,87	11,73	11,59	11,06
	$w_{\text{śr}}/w_{\text{max}}$	0,839	0,827	0,842	0,854
$(w_{\text{max}} - w_{\text{min}})/w_{\text{śr}}$	0,023	0,056	0,052	0,083	
Literatura[34]					
$w_{\text{śr}}/w_{\text{max}}$	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	
POZIOM	Profil prędkości				
	$w_{\text{śr}}$	10,05	10,12	10,10	10,15
	w_{max}	12,09	11,79	12,13	12,13
	w_{min}	11,52	11,21	11,27	11,38
	$w_{\text{śr}}/w_{\text{max}}$	0,831	0,858	0,832	0,837
	$(w_{\text{max}} - w_{\text{min}})/w_{\text{śr}}$	0,057	0,057	0,085	0,074
Literatura[34]					
$w_{\text{śr}}/w_{\text{max}}$	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	

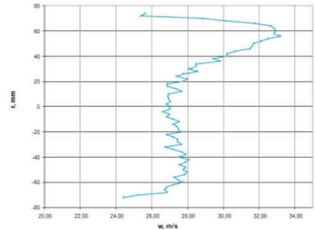
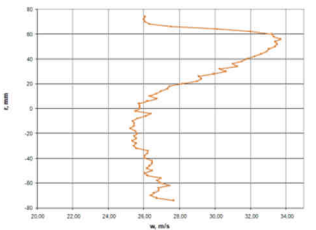
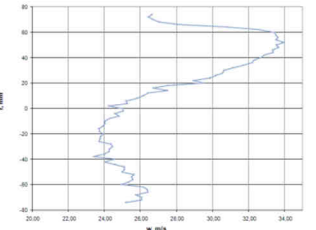
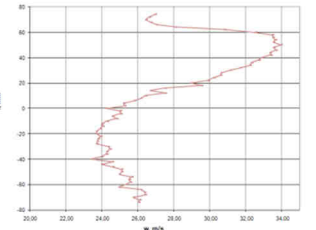
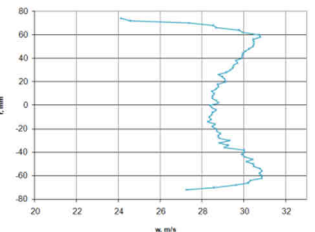
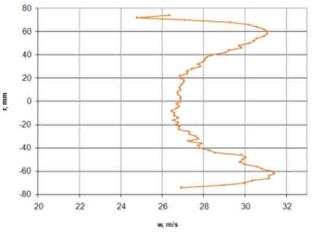
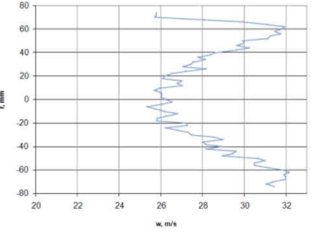
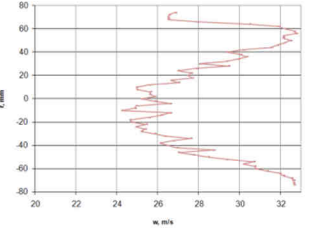
		10m/s			
		7	5	4	3
PION	Wielokrotność D				
	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	10,15	10,17	10,24	10,06
	W_{max}	12,47	13,11	13,77	13,54
	W_{min}	10,86	10,33	9,97	9,29
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,814	0,775	0,743	0,743
$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,159	0,273	0,371	0,423	
Literatura[34]	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	
$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$					
POZIOM	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	10,14	10,19	10,04	10,14
	W_{max}	12,31	12,78	12,67	13,07
	W_{min}	11,15	10,48	9,92	9,40
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,824	0,798	0,793	0,776
	$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,114	0,226	0,274	0,137
Literatura[34]	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	
$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$					

18m/s

		20	15	12	9
PION	Wielokrotność D				
	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	17,91	17,86	17,78	17,88
	W_{max}	21,43	21,10	20,81	20,57
	W_{min}	20,40	19,93	19,92	19,17
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,836	0,847	0,854	0,869
$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,058	0,065	0,050	0,078	
Literatura[34]					
$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	
POZIOM	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	17,75	17,88	17,84	17,92
	W_{max}	21,31	20,57	20,93	20,91
	W_{min}	20,34	19,68	19,96	19,83
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,833	0,869	0,852	0,857
	$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,055	0,050	0,054	0,060
Literatura[34]					
$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	

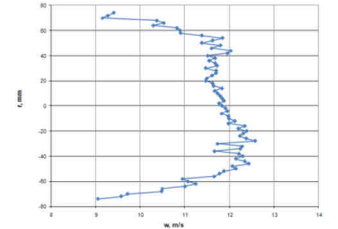
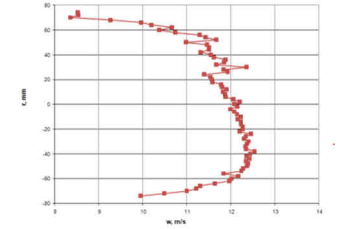
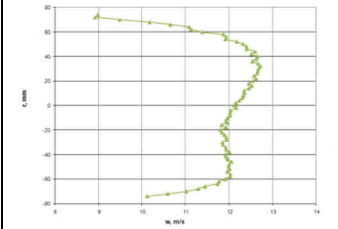
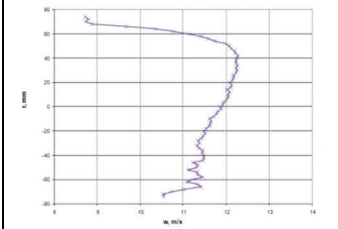
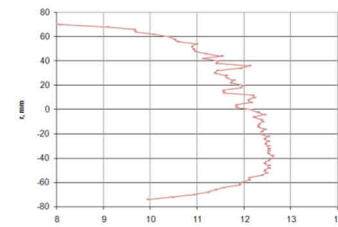
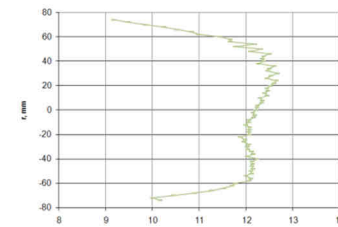
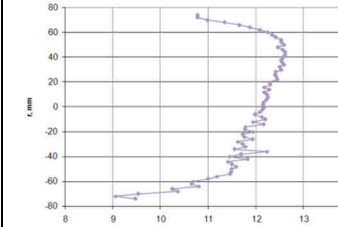
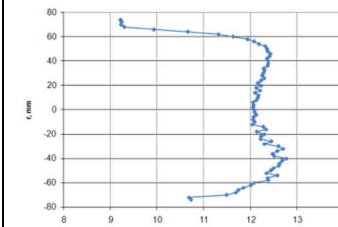
		18m/s			
Wielokrotność D		7	5	4	3
PION	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	17,86	17,92	17,90	17,88
	W_{max}	21,95	23,04	23,47	23,43
	W_{min}	19,15	18,02	17,20	16,39
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,814	0,778	0,763	0,763
	$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,157	0,278	0,351	0,393
Literatura[34] $W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	
POZIOM	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	17,84	17,87	18,01	18,06
	W_{max}	21,11	21,80	22,47	23,14
	W_{min}	19,19	17,88	17,55	17,54
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,845	0,820	0,802	0,781
	$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,108	0,220	0,273	0,310
Literatura[34] $W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	

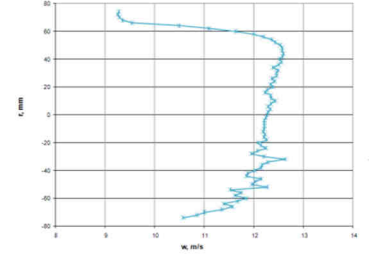
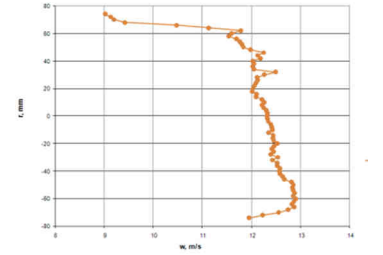
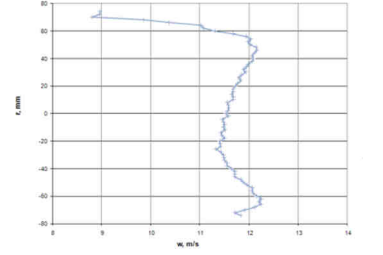
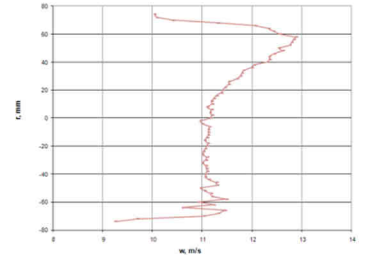
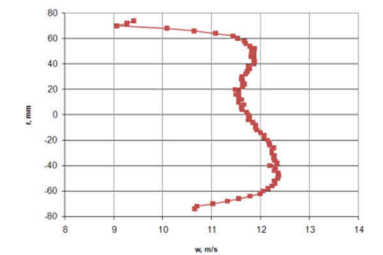
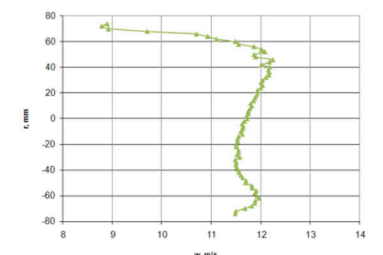
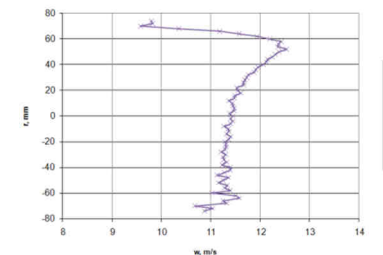
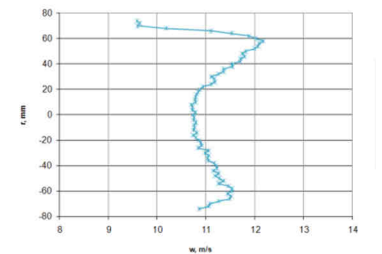
		26m/s			
		20	15	12	9
PION	Wielokrotność D				
	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	25,94	26,15	25,79	25,78
	W_{max}	31,04	30,78	30,00	29,77
	W_{min}	29,96	29,92	28,87	27,49
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,836	0,850	0,860	0,866
$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,042	0,033	0,044	0,088	
Literatura[34]					
$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	
POZIOM	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	25,82	25,82	25,82	25,85
	W_{max}	30,93	29,64	30,32	30,06
	W_{min}	29,50	28,58	28,83	28,28
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,835	0,871	0,852	0,860
	$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,055	0,041	0,031	0,069
Literatura[34]					
$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	

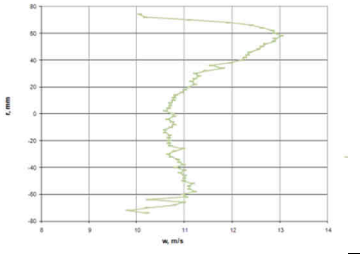
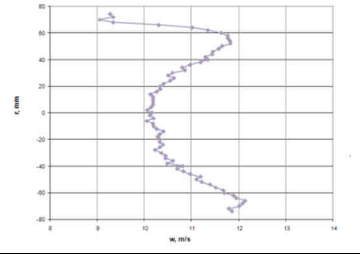
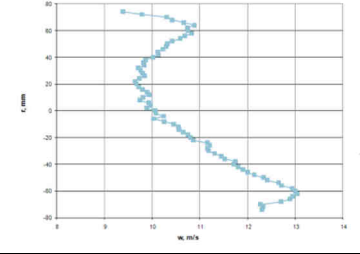
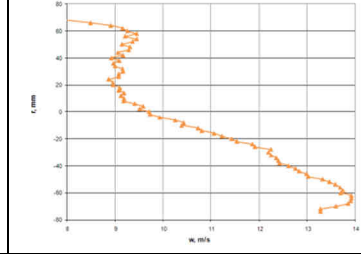
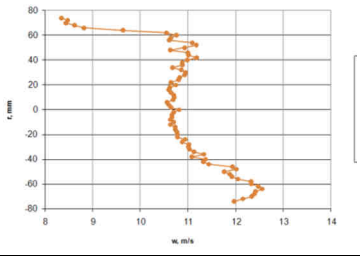
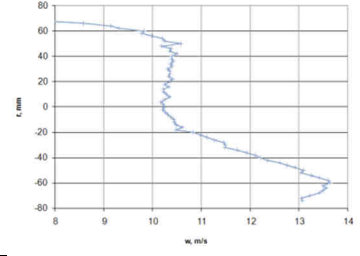
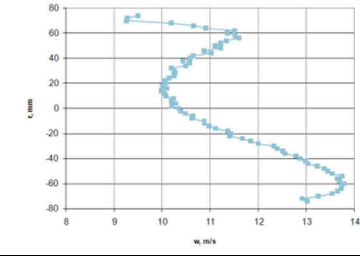
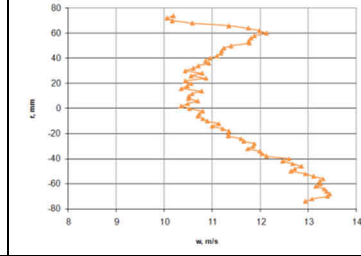
		26m/s			
		7	5	4	3
PION	Wielokrotność D				
	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	25,72	25,99	25,76	25,76
	W_{max}	31,27	33,18	33,69	33,95
	W_{min}	27,55	26,60	25,23	23,40
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,823	0,783	0,765	0,759
$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,145	0,253	0,328	0,410	
Literatura[34] $W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	
POZIOM	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	25,79	25,92	25,64	25,87
	W_{max}	30,87	31,42	32,34	32,75
	W_{min}	28,28	26,45	25,35	24,25
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,835	0,825	0,793	0,790
	$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,100	0,192	0,273	0,329
Literatura[34] $W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	

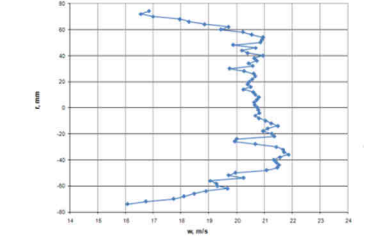
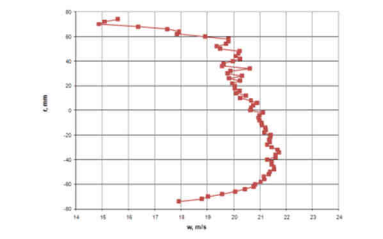
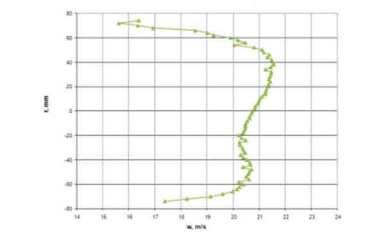
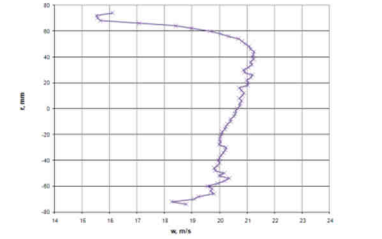
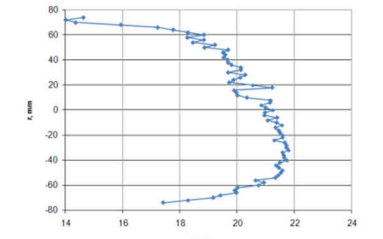
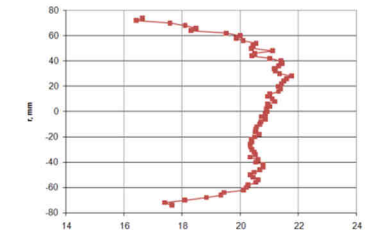
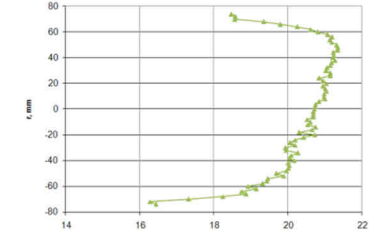
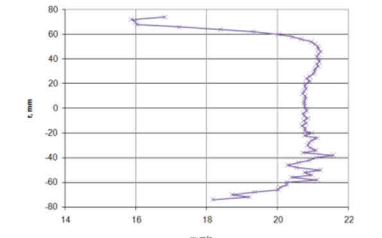
Załącznik 2

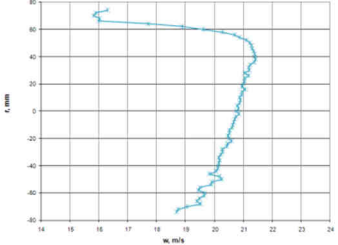
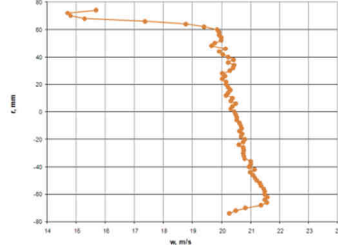
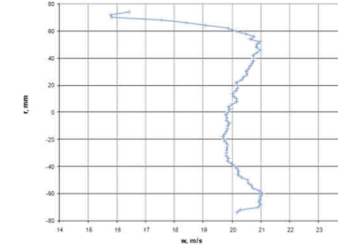
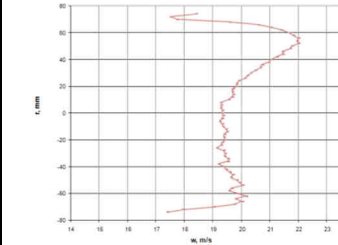
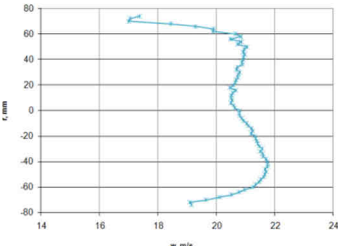
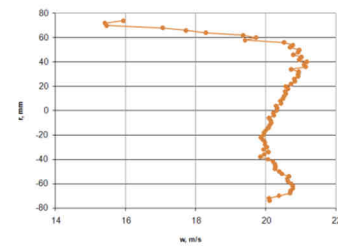
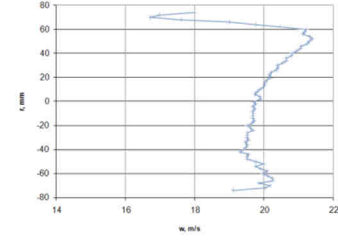
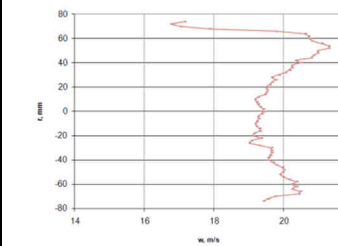
Tab. 1-2 Zestawienie danych pomiarowych za elementem zaburzającym w postaci układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach

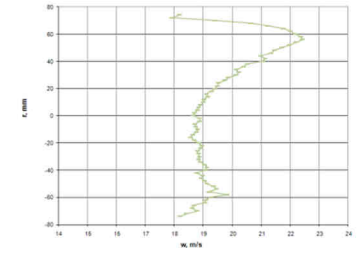
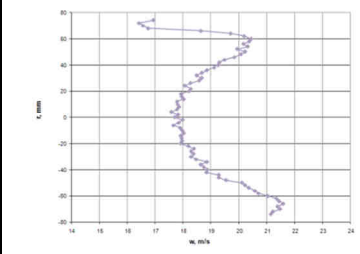
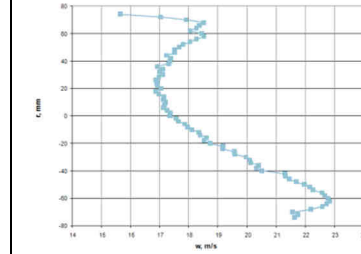
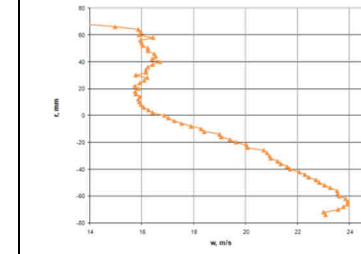
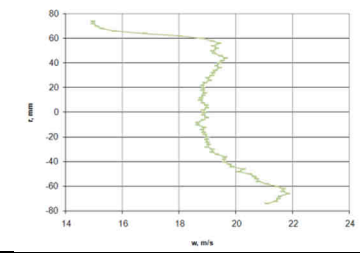
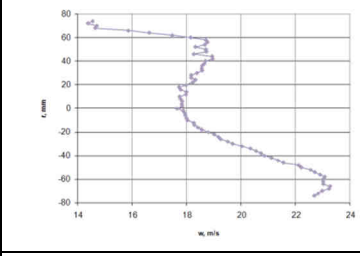
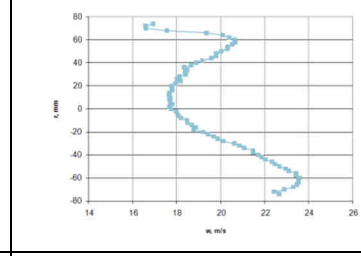
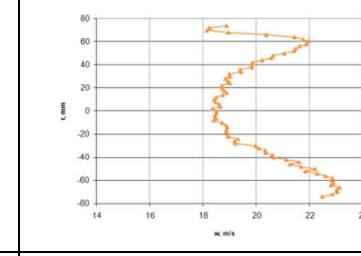
		10m/s			
Wielokrotność D		35	30	25	22
PION	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	10,00	9,96	10,08	10,08
	W_{max}	11,84	12,14	12,15	11,89
	W_{min}	11,47	11,32	11,80	11,32
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,845	0,820	0,830	0,848
	$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,037	0,083	0,034	0,056
Literatura[34] $W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	
POZIOM	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	10,00	10,24	9,75	9,79
	W_{max}	12,09	12,20	12,16	12,08
	W_{min}	11,12	11,88	11,42	12,05
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,827	0,839	0,802	0,810
	$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,097	0,031	0,076	0,003
Literatura[34] $W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	

		10m/s			
		20	15	12	9
PION	Wielokrotność D				
	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	9,79	10,07	10,16	10,17
	W_{max}	12,26	12,32	11,56	11,10
	W_{min}	11,85	12,01	11,33	10,95
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,798	0,818	0,879	0,916
$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,042	0,030	0,023	0,015	
Literatura[34]					
$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$		0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850
POZIOM	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	9,46	10,05	10,03	10,04
	W_{max}	11,75	11,71	11,41	10,76
	W_{min}	11,48	11,49	11,21	10,70
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,805	0,858	0,879	0,933
	$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,028	0,022	0,020	0,006
Literatura[34]					
$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$		0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850

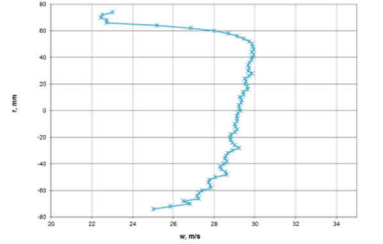
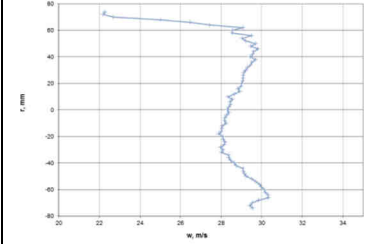
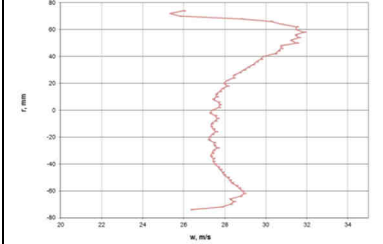
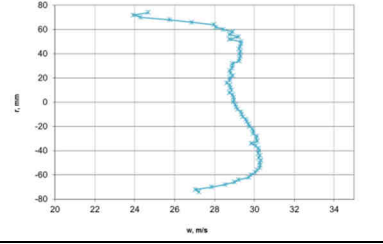
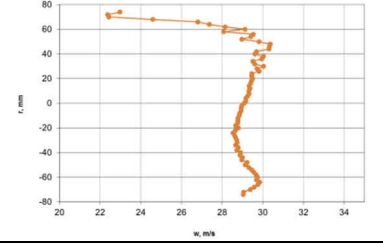
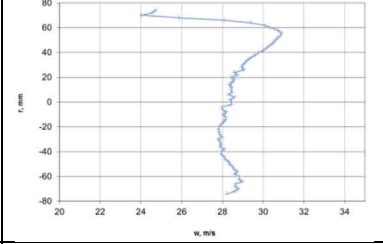
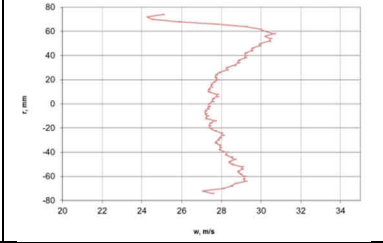
		10m/s			
		7	5	4	3
PION	Wielokrotność D				
	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	10,06	10,08	10,07	10,11
	W_{max}	10,71	10,11	10,01	9,65
	W_{min}	10,59	10,05	9,64	8,87
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,939	0,997	1,006	1,048
$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,012	0,006	0,037	0,077	
Literatura[34]	0,820÷0,850				
$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,820÷0,850				
POZIOM	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	10,09	10,11	10,13	10,13
	W_{max}	10,72	10,22	10,31	10,56
	W_{min}	10,56	10,17	9,99	10,36
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,941	0,989	0,982	0,959
	$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,016	0,005	0,032	0,020
Literatura[34]	0,820÷0,850				
$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,820÷0,850				

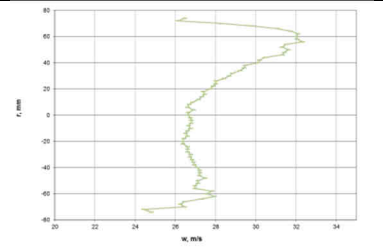
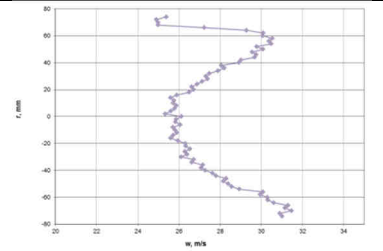
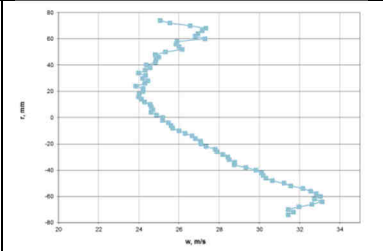
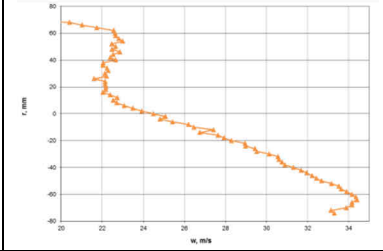
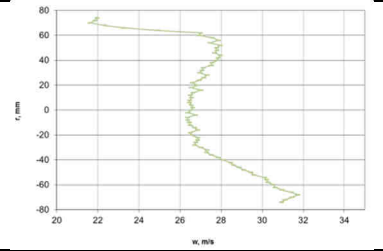
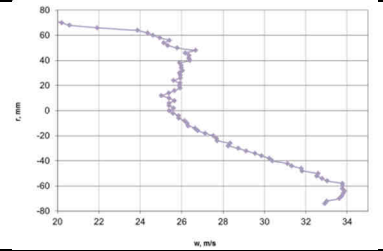
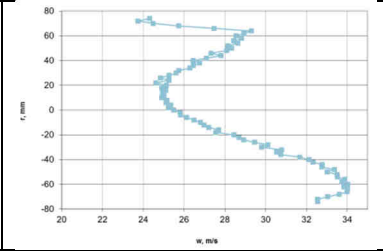
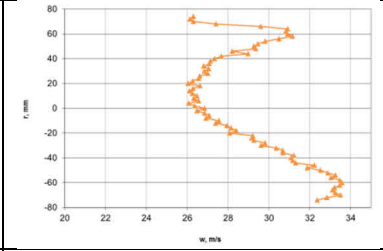
		18m/s			
		35	30	25	22
PION	Wielokrotność D				
	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	17,99	17,96	17,85	17,89
	W_{max}	21,19	20,80	20,76	20,65
	W_{min}	19,75	19,56	20,20	19,92
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,849	0,863	0,860	0,866
	$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,080	0,069	0,031	0,041
Literatura[34] $W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	
POZIOM	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	17,93	17,83	17,86	17,90
	W_{max}	21,15	20,90	20,72	20,80
	W_{min}	19,54	20,34	19,94	20,60
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,848	0,853	0,862	0,861
	$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,090	0,031	0,043	0,011
	Literatura[34] $W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850

		18m/s			
		20	15	12	9
PION	Wielokrotność D				
	Profil prędkości				
	$w_{\text{śr}}$	17,84	17,87	17,94	18,03
	w_{max}	20,82	20,41	19,85	19,34
	w_{min}	20,06	20,02	19,67	19,13
	$w_{\text{śr}}/w_{\text{max}}$	0,857	0,875	0,904	0,932
$(w_{\text{max}} - w_{\text{min}})/w_{\text{śr}}$	0,042	0,022	0,010	0,011	
Literatura[34]					
$w_{\text{śr}}/w_{\text{max}}$	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	
POZIOM	Profil prędkości				
	$w_{\text{śr}}$	17,92	17,83	17,88	17,98
	w_{max}	20,74	20,29	19,80	19,41
	w_{min}	20,47	19,85	19,31	19,01
	$w_{\text{śr}}/w_{\text{max}}$	0,864	0,879	0,903	0,926
	$(w_{\text{max}} - w_{\text{min}})/w_{\text{śr}}$	0,015	0,024	0,027	0,022
Literatura[34]					
$w_{\text{śr}}/w_{\text{max}}$	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	

		18m/s			
		7	5	4	3
PION	Wielokrotność D				
	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	17,91	17,81	17,87	17,86
	W_{max}	18,75	17,83	17,43	16,77
	W_{min}	18,57	17,59	16,87	15,74
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,955	0,999	1,025	1,065
$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,010	0,014	0,031	0,058	
Literatura[34]					
$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	
POZIOM	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	17,97	17,83	17,86	17,96
	W_{max}	18,87	17,80	17,80	18,46
	W_{min}	18,65	17,66	17,64	18,36
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,952	1,002	1,004	0,973
	$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,012	0,008	0,009	0,006
Literatura[34]					
$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	

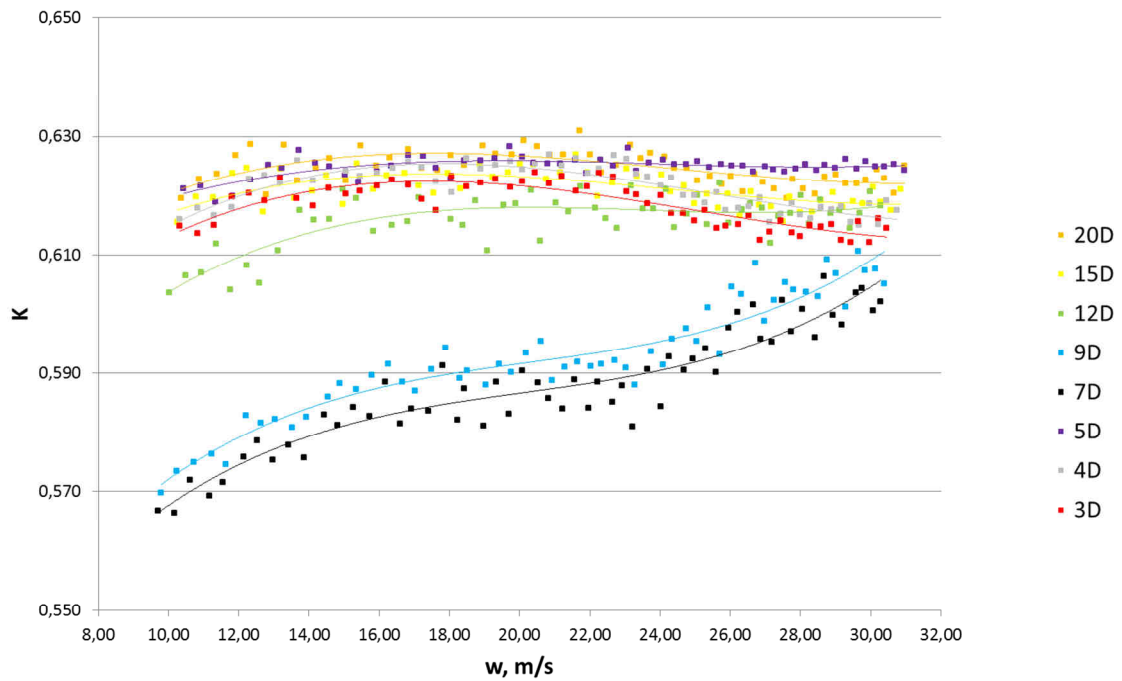
		26m/s			
		35	30	25	22
PION	Wielokrotność D				
	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	25,85	25,93	25,85	25,86
	W_{max}	30,64	29,80	29,78	29,62
	W_{min}	27,63	28,24	29,21	28,40
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,844	0,870	0,868	0,873
$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,117	0,060	0,022	0,047	
Literatura[34]					
$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	
POZIOM	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	25,88	25,81	25,80	25,93
	W_{max}	30,59	29,96	29,38	29,16
	W_{min}	27,86	28,03	28,00	28,59
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,846	0,862	0,878	0,889
	$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,105	0,075	0,053	0,022
Literatura[34]					
$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	

		26m/s			
		20	15	12	9
PION	Wielokrotność D				
	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	25,88	25,90	25,81	25,82
	W_{max}	29,23	28,76	28,36	27,45
	W_{min}	28,30	28,11	27,88	27,21
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,885	0,901	0,910	0,941
$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,036	0,025	0,018	0,009	
Literatura[34]	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	
$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$					
POZIOM	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	25,87	25,87	25,81	25,89
	W_{max}	28,99	29,07	28,42	27,41
	W_{min}	28,60	28,54	27,81	27,17
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,892	0,890	0,908	0,944
	$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,015	0,021	0,024	0,009
Literatura[34]	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	0,820÷0,850	
$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$					

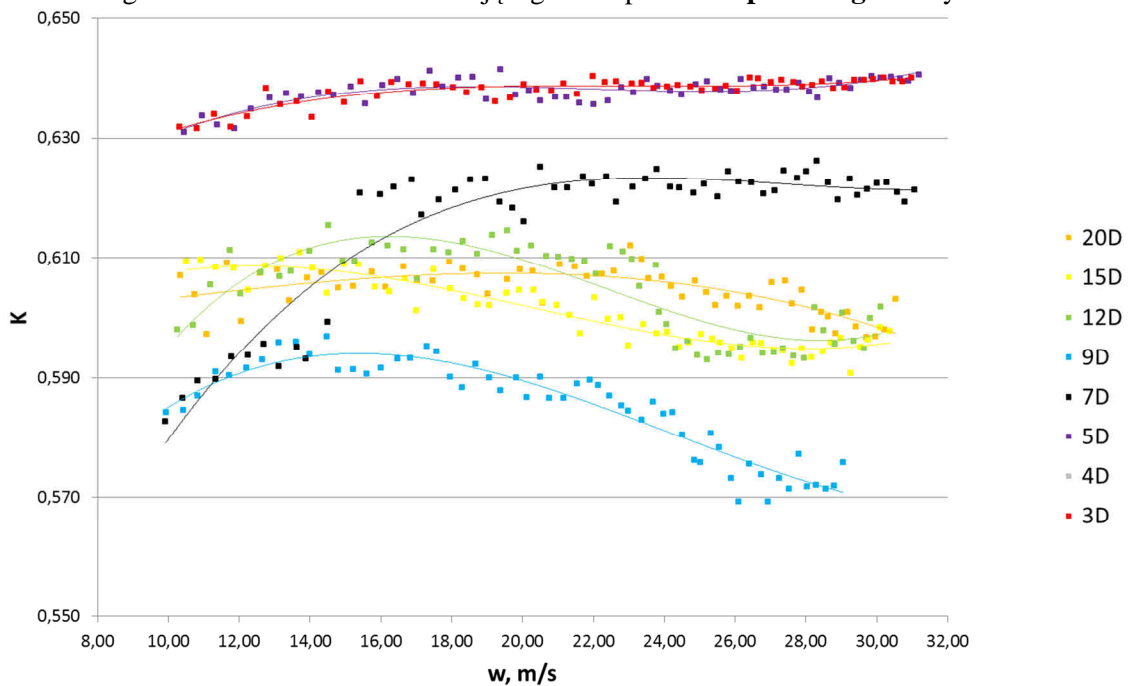
		26m/s			
		7	5	4	3
PION	Wielokrotność D				
	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	25,83	25,87	25,72	25,46
	W_{max}	26,67	25,77	25,08	24,50
	W_{min}	26,37	25,33	23,84	21,61
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,968	1,004	1,026	1,039
$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,012	0,017	0,048	0,114	
Literatura[34]	0,820±0,850	0,820±0,850	0,820±0,850	0,820±0,850	
$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$					
POZIOM	Profil prędkości				
	$W_{\text{śr}}$	25,90	25,68	25,62	25,52
	W_{max}	26,52	25,53	25,51	26,56
	W_{min}	26,36	25,02	24,61	26,04
	$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$	0,977	1,006	1,004	0,961
	$(W_{\text{max}} - W_{\text{min}})/W_{\text{śr}}$	0,006	0,020	0,035	0,020
Literatura[34]	0,820±0,850	0,820±0,850	0,820±0,850	0,820±0,850	
$W_{\text{śr}}/W_{\text{max}}$					

Załącznik 3

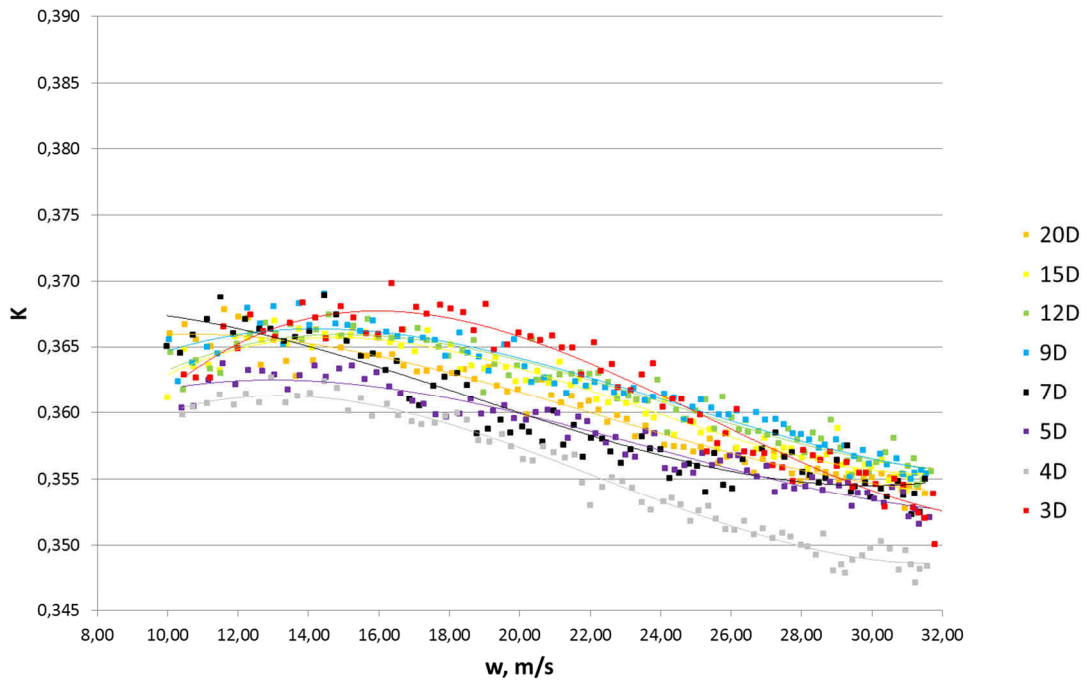
Wyniki pomiarów współczynnika przepływu K analizowanych sond dla elementu zaburzającego w postaci układu kolan segmentowych $3 \times 30^\circ$.



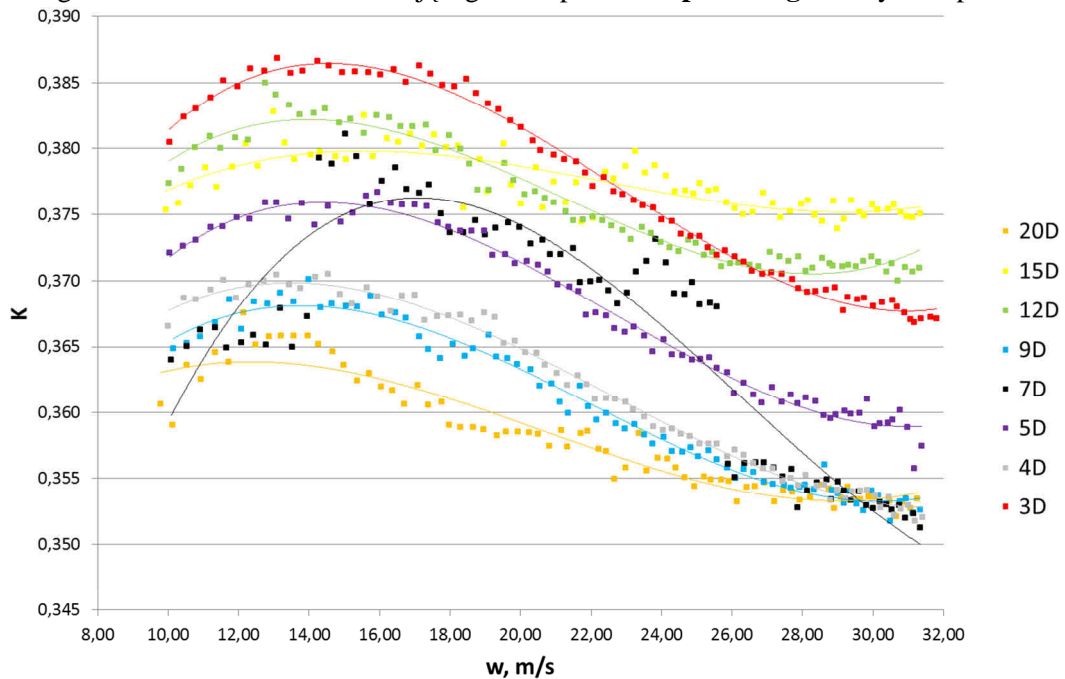
Rys. 3-1 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **poziomego** sondy Accubar



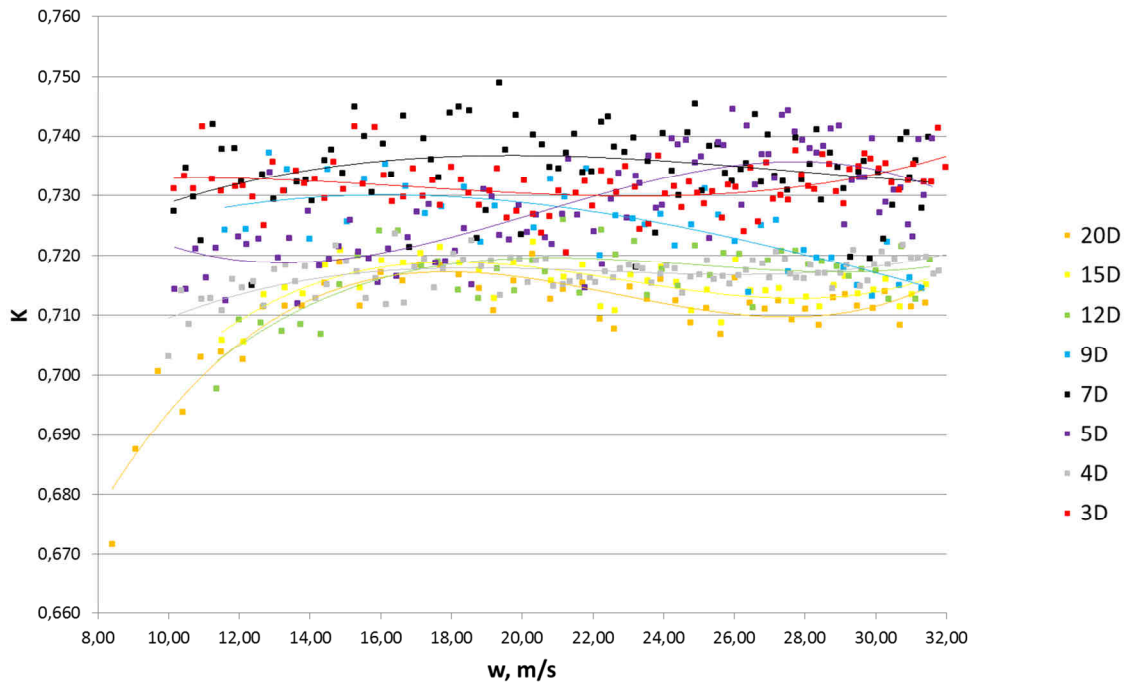
Rys. 3-2 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **pionowego** sondy Accubar



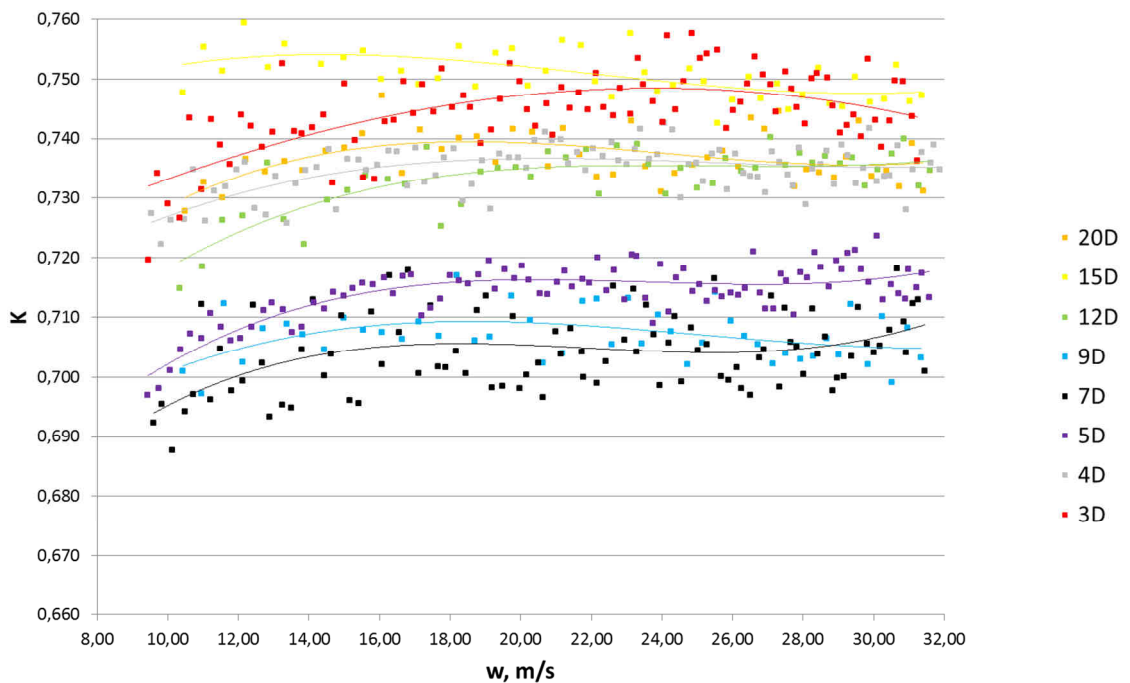
Rys. 3-3 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **poziomego** sondy Dwuprofilowej



Rys. 3-4 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **pionowego** sondy Dwuprofilowej



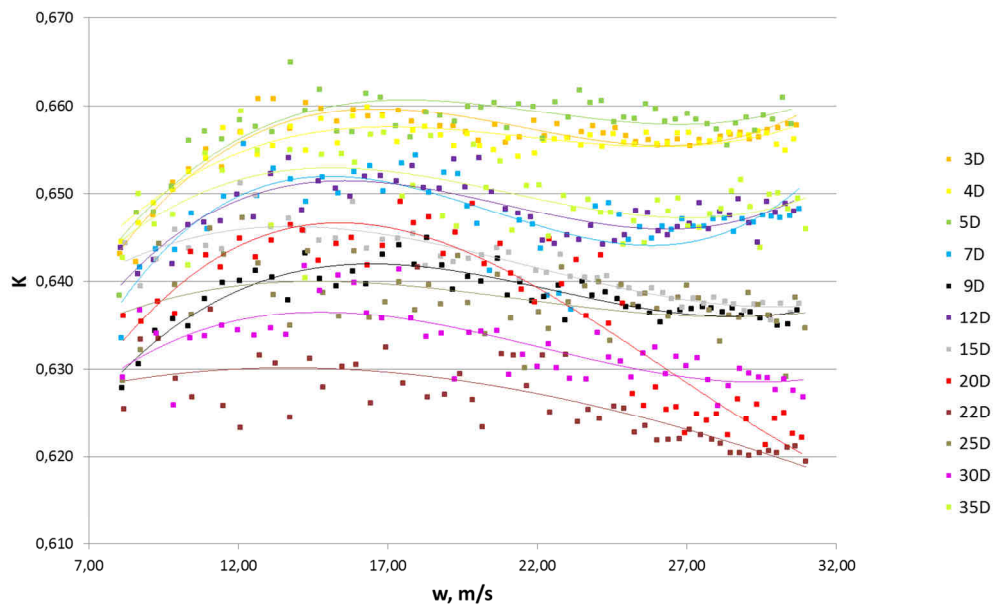
Rys. 3-5 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **poziomego** sondy Introbar



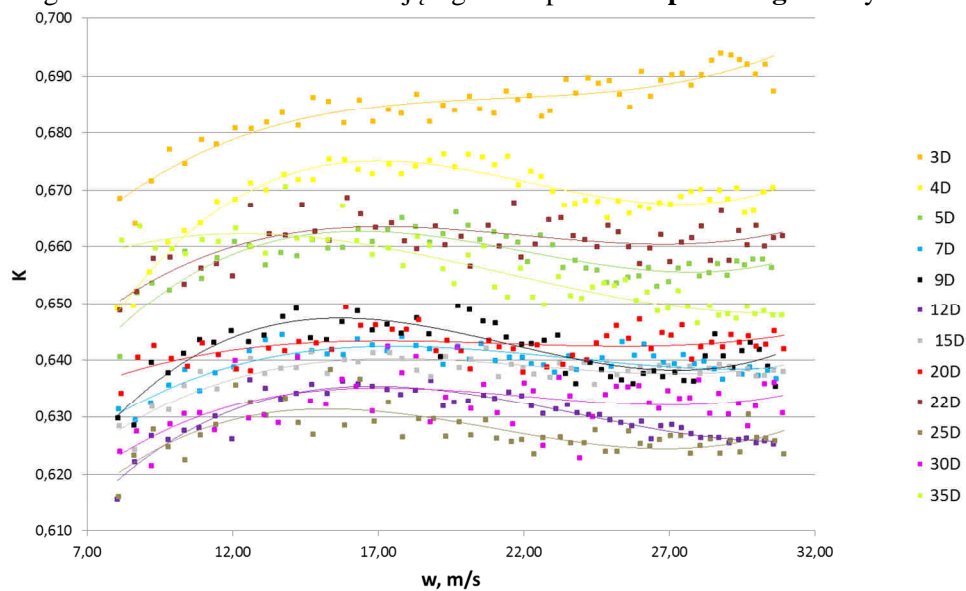
Rys. 3-6 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **pionowego** sondy Introbar

Załącznik 4

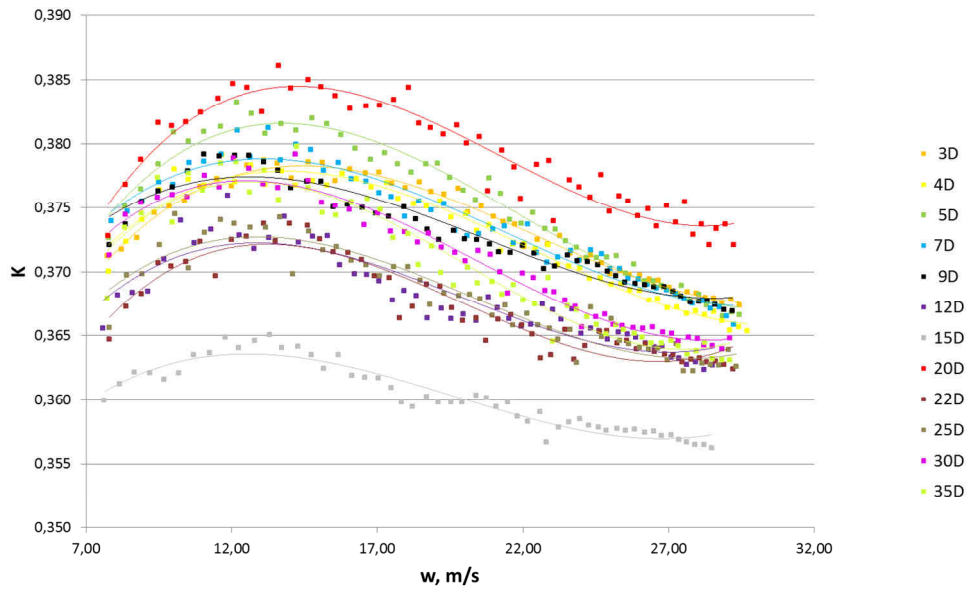
Wyniki pomiarów współczynnika przepływu K analizowanych sond dla elementu zaburzającego w postaci układu kolan segmentowych w różnych płaszczyznach.



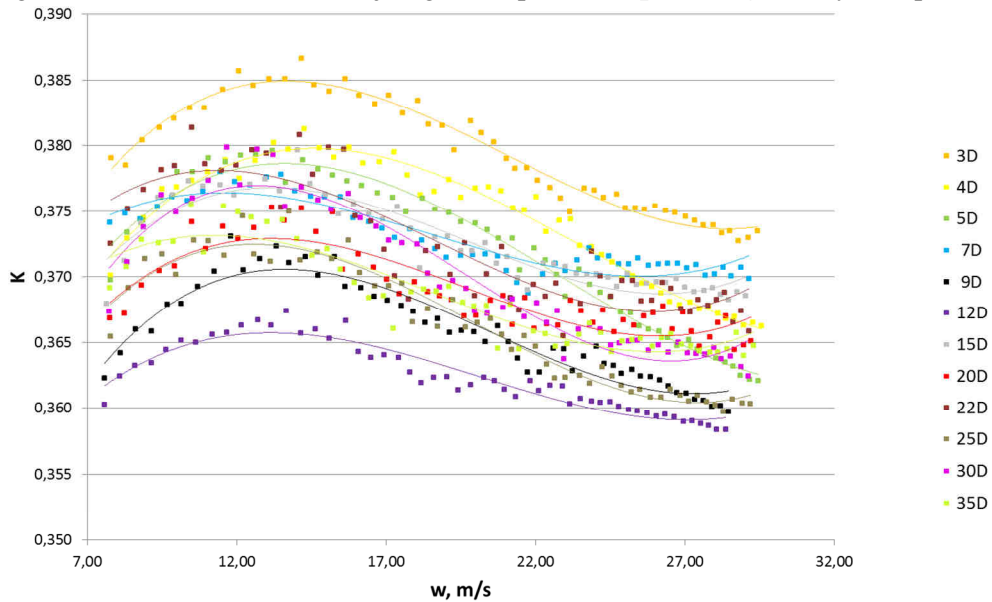
Rys. 4-1 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **poziomego** sondy Accubar



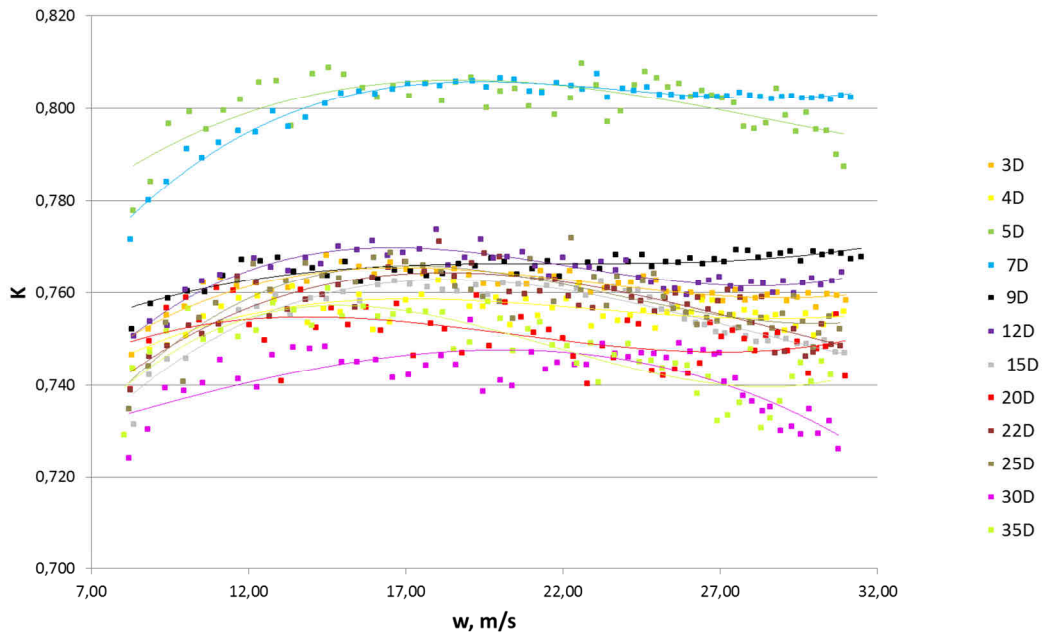
Rys. 4-2 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **pionowego** sondy Accubar



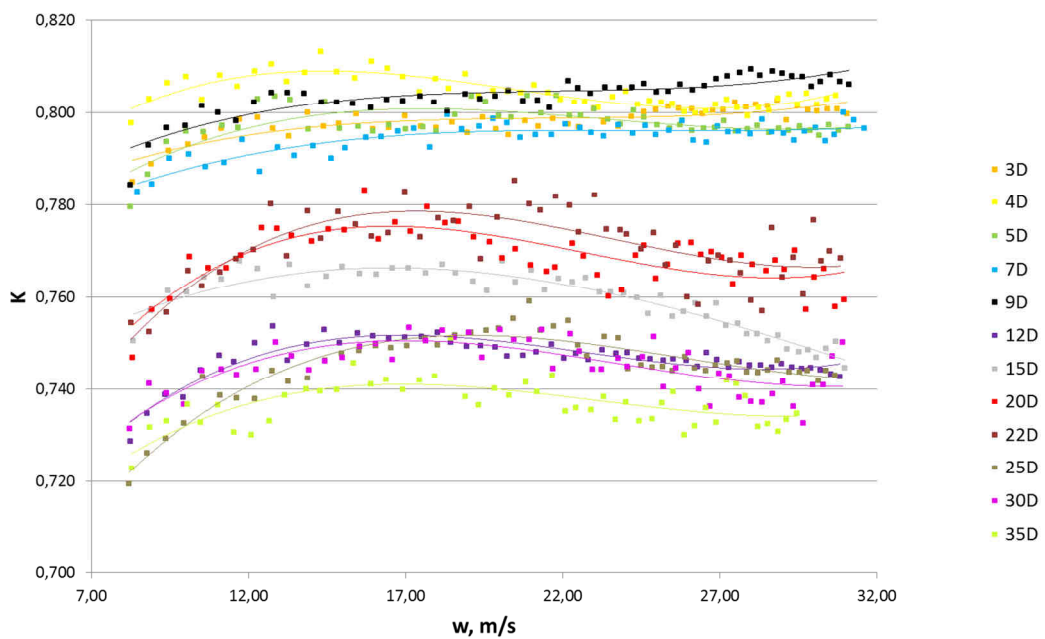
Rys. 4-3 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **poziomego** sondy Dwuprofilowej



Rys. 4-4 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **pionowego** sondy Dwuprofilowej



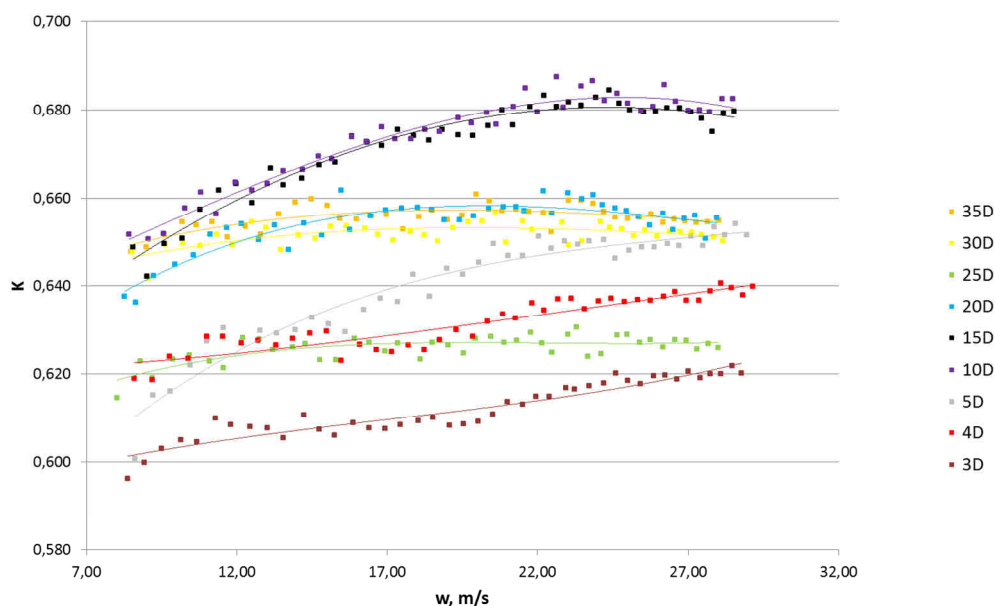
Rys. 4-5 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **poziomego** sondy Introbar



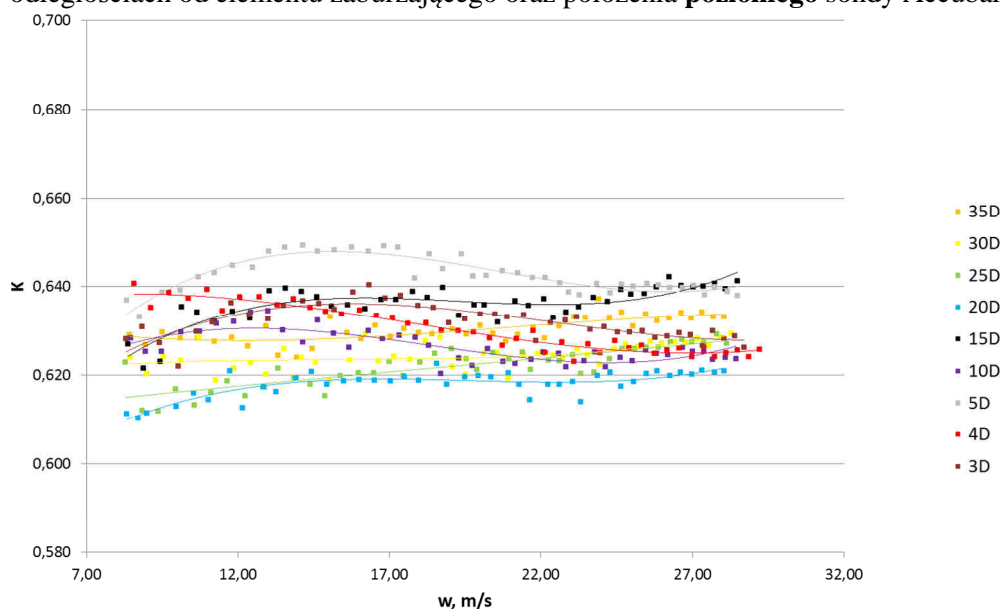
Rys. 4-6 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **pionowego** sondy Introbar

Załącznik 5

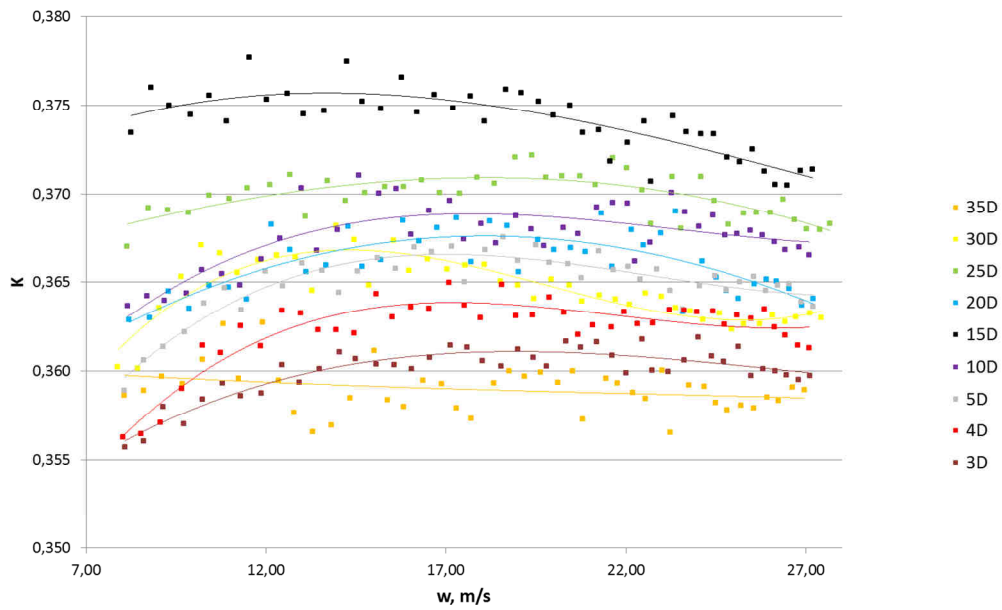
Wyniki pomiarów współczynnika przepływu K analizowanych sond dla elementu zaburzającego w postaci przepustnicy w pełni otwartej.



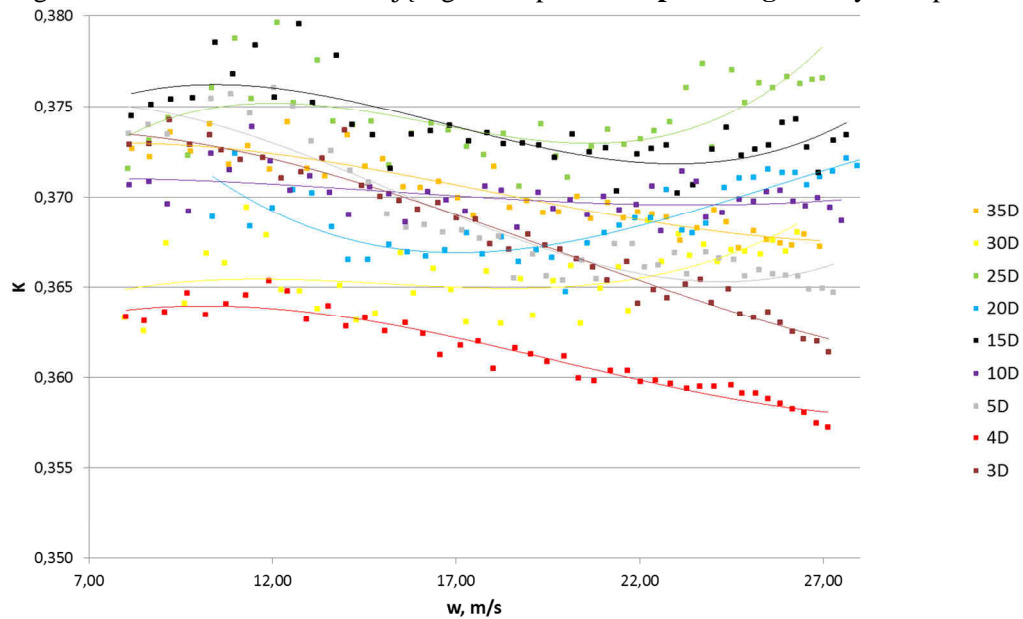
Rys. 5-1 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **poziomego** sondy Accubar



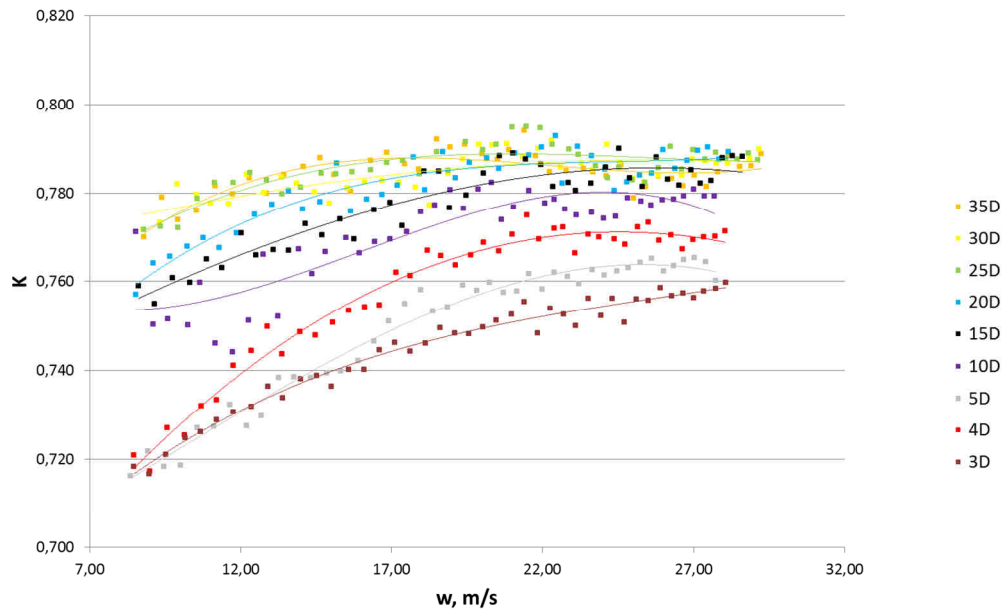
Rys. 5-2 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **pionowego** sondy Accubar



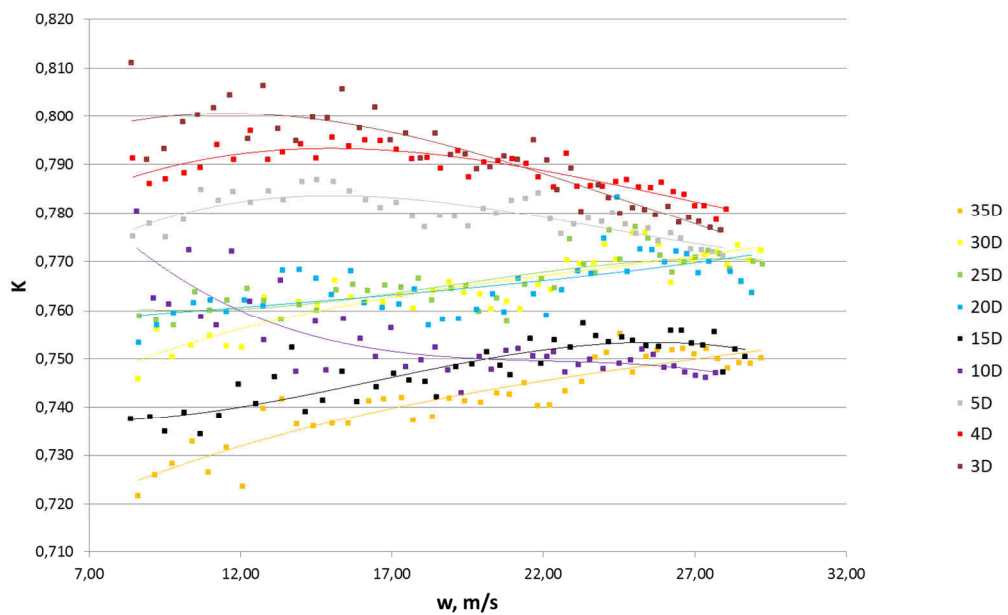
Rys. 5-3 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **poziomego** sondy Dwuprofilowej



Rys. 5-4 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **pionowego** sondy Dwuprofilowej



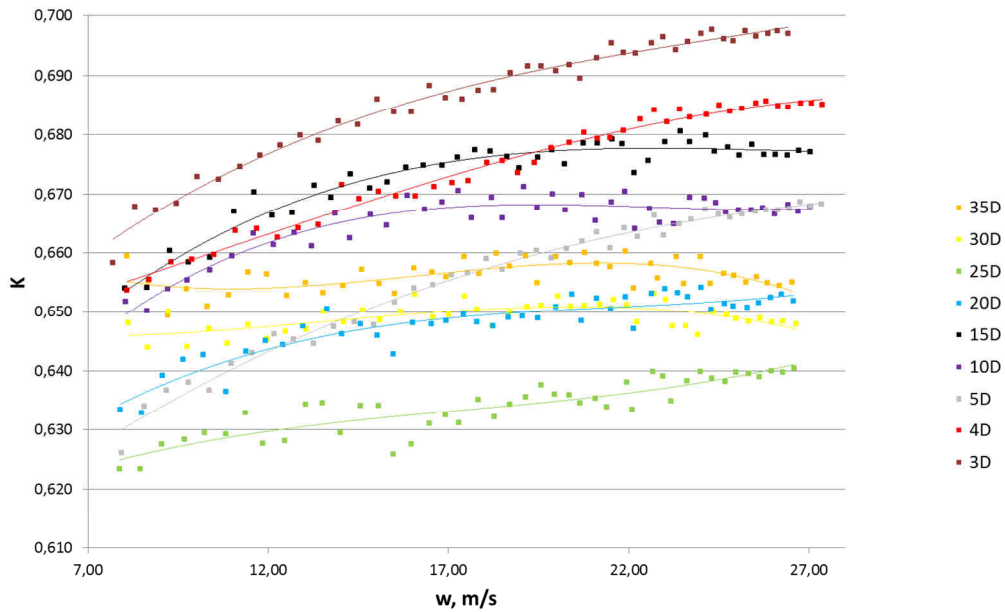
Rys. 5-5 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **poziomego** sondy Introbar



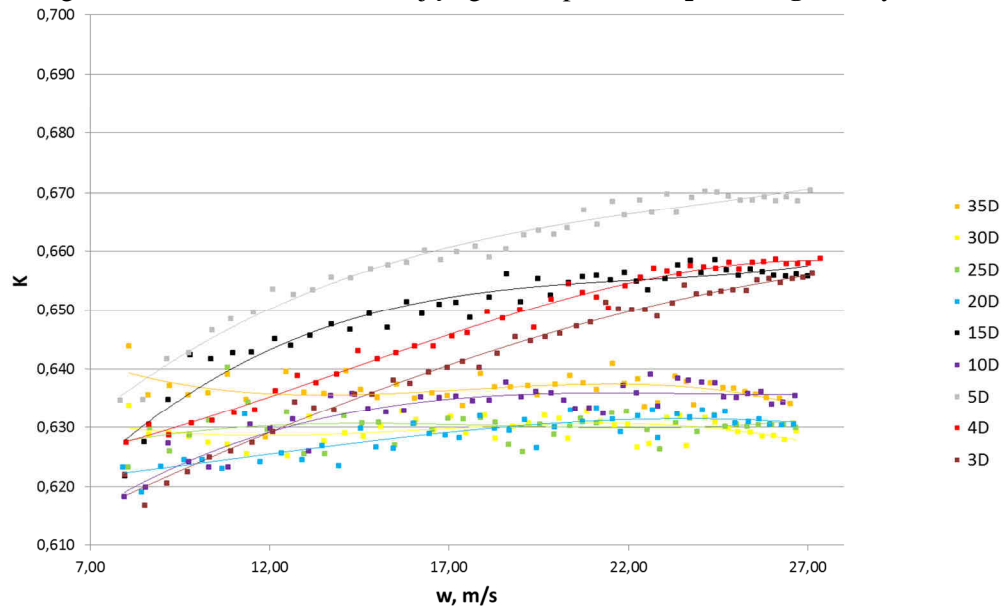
Rys. 5-6 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **pionowego** sondy Introbar

Załącznik 6

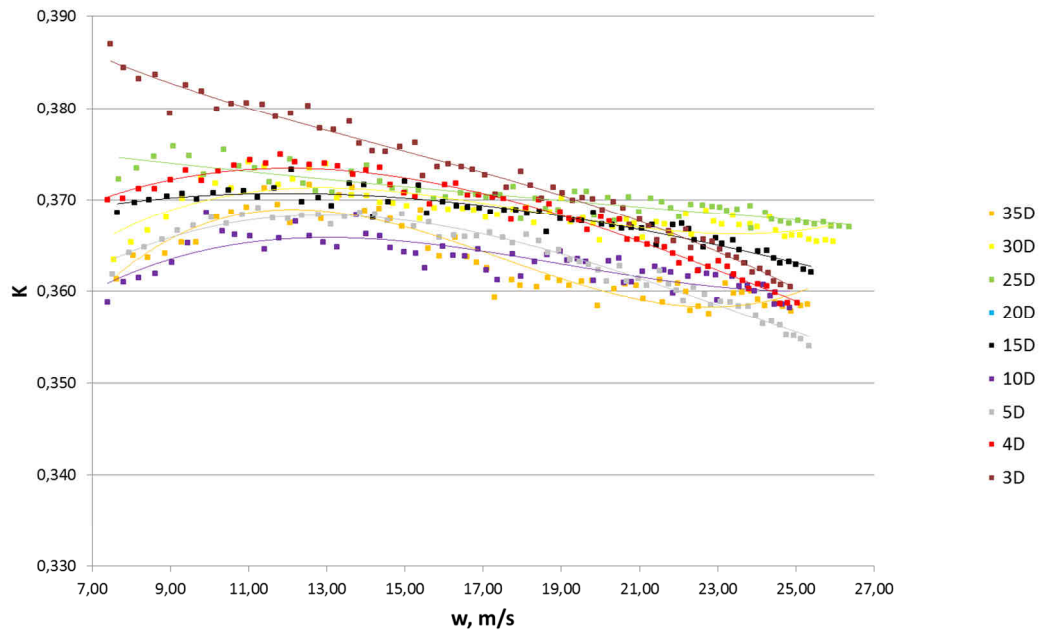
Wyniki pomiarów współczynnika przepływu K analizowanych sond dla elementu zaburzającego w postaci przepustnicy otwartej w 50%.



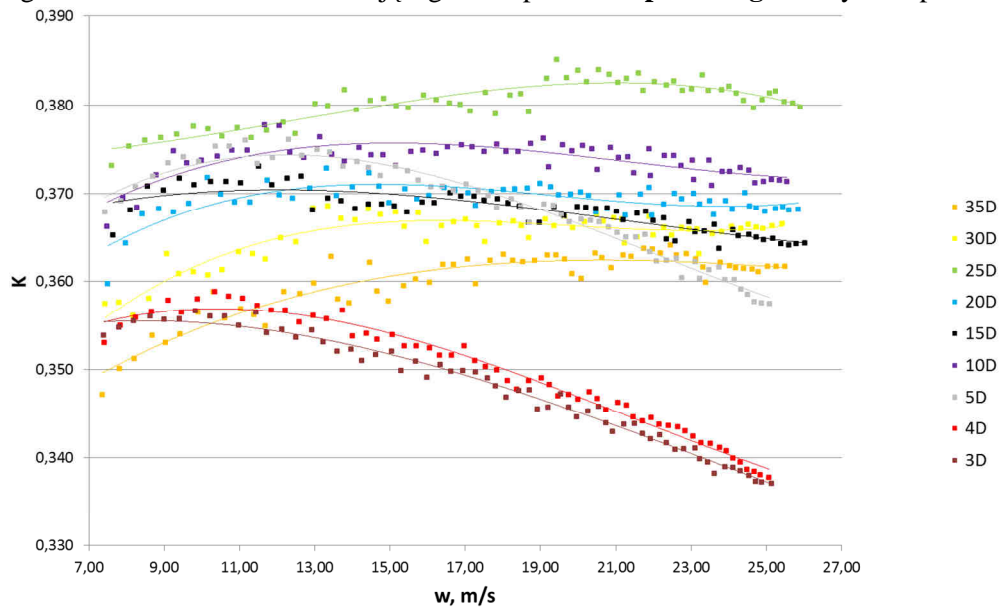
Rys. 6-1 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **poziomego** sondy Accubar



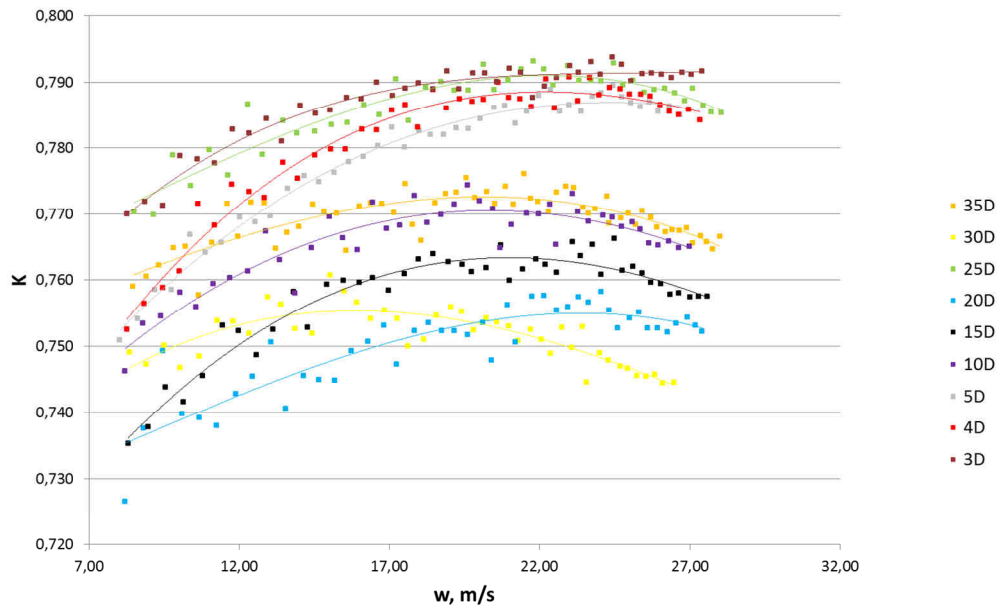
Rys. 6-2 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **pionowego** sondy Accubar



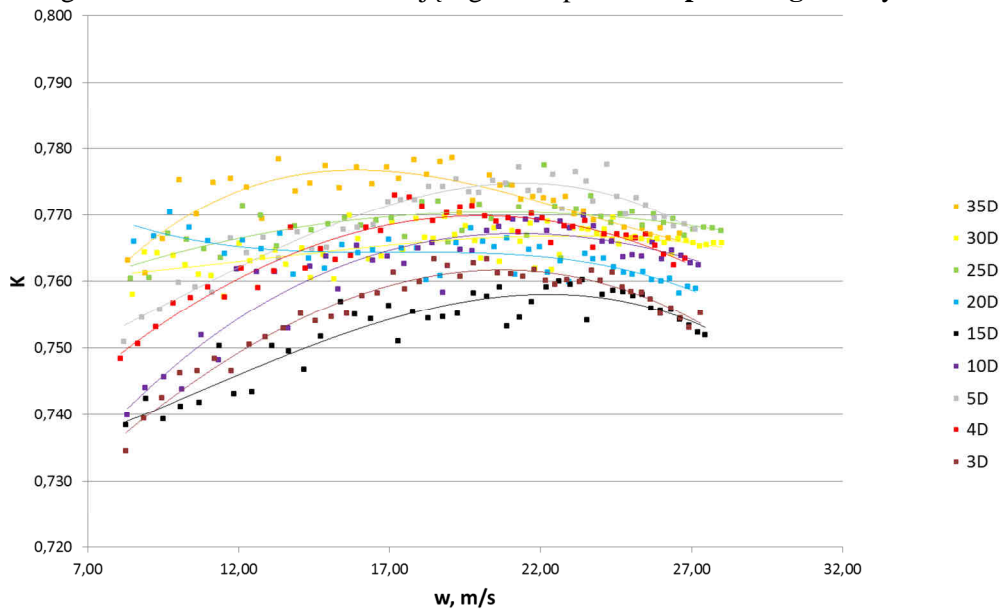
Rys. 6-3 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **poziomego** sondy Dwuprofilowej



Rys. 6-4 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **pionowego** sondy Dwuprofilowej



Rys. 6-5 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **poziomego** sondy Introbar



Rys. 6-6 Wykres zależności współczynnika przepływu K w funkcji prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego oraz położenia **pionowego** sondy Introbar