



Politechnika Wroclawska

**Wydział Mechaniczno-Energetyczny**

dyscyplina: **Budowa i eksploatacja maszyn**

dyscyplina obrony: **inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka**

Praca doktorska

**Analiza metrologiczna zastosowania  
przepływomierza ultradźwiękowego w rurociągu w  
miejscu za zasuwą**

mgr inż. Piotr Piechota

**Słowa kluczowe:**

Przepływomierze ultradźwiękowe  
Rozkład prędkości  
Zaburzenie przepływu  
Zasuwa nożowa

Promotor: dr hab. inż.  
Artur Andruszkiewicz .....  
profesor uczelni  
*imię i nazwisko* *ocena* *podpis*

Promotor dr inż.  
pomocniczy: Wiesław Wędrychowicz .....  
*imię i nazwisko* *ocena* *podpis*

Wrocław 2022



## Spis treści

Spis najważniejszych użytych symboli .....	5
1. Wstęp.....	6
2. Analiza zagadnień i teza prac .....	9
2.1 Teza pracy.....	10
2.1.1 Kompensacja błędu pomiaru w warunkach niestandardowych.....	10
2.1.2 Identyfikacja optymalnego punktu pomiarowego .....	10
2.2 Cel pracy.....	10
2.3 Zakres pracy .....	10
3. Pomiar strumienia przepływu.....	12
3.1 Podział metod pomiaru strumienia przepływu .....	12
3.2 Metoda ultradźwiękowa pomiaru strumienia przepływu .....	13
3.2.1 Przepływomierze ultradźwiękowe serii Dopplera .....	14
3.2.2 Przepływomierze ultradźwiękowe typu transit-time .....	14
3.2.3 Przepływomierze ultradźwiękowe wielodrogowe .....	20
3.3 Zastosowanie przepływomierzy ultradźwiękowych w praktyce pomiarowej.....	20
4. Opis matematyczny zjawiska przepływu płynu .....	24
4.1 Przepływ przejściowy .....	26
4.2 Przepływ laminarny .....	26
4.3 Przepływ turbulentny.....	27
4.3.1 Wzór uniwersalny .....	27
4.3.2 Wzór trójskładnikowy.....	27
4.3.3 Wzór Prandtla .....	29
4.4 Przegląd modeli matematycznych przepływu turbulentnego o zaburzonym rozkładzie prędkości. Wyznaczenie wartości współczynnika K dla modeli.....	32
5. Przeprowadzenie badań – pomiar prędkości przepływu .....	56
5.1 Stanowisko badawcze.....	56
5.2 Metodyka przeprowadzania badań .....	59
5.3 Analiza metrologiczna przepływomierza ultradźwiękowego w pomiarach za zasłoną nożową .....	62
6. Wyniki pomiarów.....	64
6.1 Wyniki pomiarów prędkości przy 1/3 zamknięcia zasuw .....	64
6.1.1 Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 35\ 000$ i układzie głowic Z... 64	
6.1.2 Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 35\ 000$ i układzie głowic V... 72	
6.1.3 Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 35\ 000$ – podsumowanie..... 80	
6.1.4 Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 70\ 000$ i układzie głowic Z... 82	
6.1.5 Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 70\ 000$ i układzie głowic V... 90	
6.1.6 Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 70\ 000$ – podsumowanie..... 98	
6.1.7 1/3 zamknięcia – podsumowanie wszystkich serii pomiarowych .....	100
6.2 Wyniki pomiarów prędkości przy 1/2 zamknięcia zasuw .....	103
6.2.1 Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 35\ 000$ i układzie głowic Z. 103	

6.2.2	Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 35\ 000$ i układzie głowic V.	111
6.2.3	Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 35\ 000$ – podsumowanie....	119
6.2.4	Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 70\ 000$ i układzie głowic Z.	121
6.2.5	Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 70\ 000$ i układzie głowic V.	129
6.2.6	Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 70\ 000$ – podsumowanie.....	136
6.2.7	1/2 zamknięcia – podsumowanie wszystkich serii pomiarowych .....	139
6.3	Analiza niepewności pomiarowej ultradźwiękowego pomiaru prędkości ...	142
7.	Wykorzystanie anemometrii laserowej (LDA) do identyfikacji rozkładu prędkości	146
7.1	Prezentacja wyników pomiarów LDA .....	148
7.2	Wyniki LDA dla $Re \approx 35\ 000$ .....	149
7.3	Wyniki LDA dla $Re \approx 70\ 000$ .....	154
7.4	LDA – analiza wyników dla $Re \approx 35\ 000$ i $Re \approx 70\ 000$ .....	159
7.5	LDA – rozkłady prędkości dla $Re \approx 35\ 000$ - 1/3 zamknięcia .....	161
7.6	LDA – rozkłady prędkości dla $Re \approx 35\ 000$ – 1/2 zamknięcia.....	165
7.7	LDA – rozkłady prędkości dla $Re \approx 70\ 000$ - 1/3 zamknięcia .....	168
7.8	LDA – rozkłady prędkości dla $Re \approx 70\ 000$ – 1/2 zamknięcia.....	171
8.	Podsumowanie i wnioski końcowe .....	174
8.1	Potwierdzenie tezy 2.1.1 .....	175
8.2	Potwierdzenie tezy 2.1.2.....	175
8.2.1	1/3 wysokości zamknięcia zasuwę .....	176
8.2.2	1/2 wysokości zamknięcia zasuwę .....	176
8.3	Kluczowe wnioski i obserwacje .....	177
8.4	Zalecenia pomiarowe.....	178
9.	Bibliografia.....	179

## Spis najważniejszych użytych symboli

- A – przekrój poprzeczny rurociągu,  $m^2$   
c – prędkość dźwięku, m/s  
D – średnica (wewnętrzna) rurociągu, mm  
(1, ... , 15)D – odległość przekroju pomiarowego od zasuw, mierzona wielokrotnością średnicy (zewnątrznej) rurociągu d, -  
k – współczynnik charakteryzujący zniekształcenie rozkładu prędkości zależny od rodzaju przepływu, -  
 $k_r$  – współczynnik rozszerzenia niepewności pomiarowej, -  
 $K^*$  – współczynnik kształtu rozkładu prędkości, -  
 $K_{anem}^*$  - współczynnik kształtu rozkładu prędkości wyznaczany dla danych pochodzących z anemometrii laserowej LDA, -  
 $K_i^*$  - współczynnik kształtu rozkładu prędkości wyznaczany dla i-tego modelu rozkładu prędkości, -  
 $K_{rz}^*$  - rzeczywisty współczynnik kształtu rozkładu prędkości (współczynnik korekcyjny) wyznaczony na podstawie danych pomiarowych, -  
m, a – dodatkowe współczynniki opisujące zniekształcenie rozkładu prędkości, -  
n – współczynnik równania rozkładu prędkości związany z rodzajem przepływu, -  
 $q_v$  – strumień objętości przepływu,  $m^3/s$   
r – odległość punktu od osi rurociągu, mm  
R – promień rurociągu, mm  
Re – liczba Reynoldsa przepływu, -  
t – temperatura medium przepływowego,  $^{\circ}C$   
 $t_1, t_2$  – czas przejścia fali pomiędzy czujnikami przepływomierza, s  
U(v) – niepewność rozszerzona pomiaru prędkości przepływu, m/s  
v - prędkość przepływu, m/s  
 $v_c$  - prędkość przepływu po drodze przejścia fali ultradźwiękowej, m/s  
 $v_d$  - prędkość przepływu po średnicy rurociągu, m/s  
 $v_p$  - prędkość przepływu zmierzona przed zasuwą nożową, m/s  
 $v_s$  - prędkość przepływu w przekroju rurociągu, m/s  
 $v_z$  - prędkość przepływu zmierzona za zasuwą nożową, m/s
- $\alpha$  – kąt ustawienia głowic przepływomierza ultradźwiękowego, kat przejścia fali ultradźwiękowej przez przestrzeń pomiarową,  $^{\circ}$   
 $\vartheta$  – współrzędna kątowa położenia elementu płynu,  $^{\circ}$   
 $\rho$  – gęstość medium przepływowego (wody),  $kg/m^3$   
 $\delta_{gr}$  – błąd graniczny pomiaru prędkości przepływomierza ultradźwiękowego, m/s  
 $\sigma_{v_{\bar{s}r}}$  – odchylenia standardowe średniej prędkości przepływu, m/s  
 $\mu$  – lepkość dynamiczna płynu,  $Pa \cdot s$

## 1. Wstęp

Pomiary strumienia przepływu należą do najważniejszych pomiarów w inżynierskiej praktyce pomiarowej. [1] [2] [3] [4] [5] [6] Z koniecznością pomiaru strumienia masy lub objętości mamy do czynienia w przemyśle energetycznym, chemicznym, petrochemicznym, a także w wielu innych dziedzinach inżynierskich takich jak budownictwo czy inżynieria środowiska. [7] [8] [9] [10] W przemyśle energetycznym parametrem mierzonym może być strumień przepływu wody chłodzącej w obiegu Clausiusa-Rakine'a. [11] [12] W dziedzinie inżynierii środowiska bardzo istotne jest posiadanie informacji o przepływie medium w instalacjach klimatyzacji, wentylacji czy też instalacjach grzewczych. Określenie strumienia przepływu medium odgrywa fundamentalną rolę w sporządzaniu bilansu masy i bilansu energetycznego układu.

Na podstawie przytoczonych powyżej przykładów widoczne jest jak szerokie jest spektrum dziedzin inżynierii, w których zachodzi potrzeba wykonania pomiaru przepływu. Ciągły rozwój technologiczny pociąga za sobą konieczność wykonywania pomiarów z wysoką dokładnością. Istotne jest wykonanie pomiaru prędkości i strumienia przepływu z największą możliwą dokładnością, ponieważ ta informacja jest najczęściej szeroko wykorzystywana w procesie obliczeniowym czy też w pracy systemu sterowania danej instalacji. Niepewność pomiaru strumienia przepływu, zgodnie z prawem propagacji niepewności [13] [14], rzutuje więc na końcową niepewność, którą są obarczone wykonanie bilansu cieplno-przepływowego i określenie wartości masy, entropii, entalpii i innych parametrów fizycznych i termodynamicznych. [12] Rezultaty pomiarów mogą służyć do odpowiedniego zarządzania procesem technologicznym. Mogą też stanowić podstawę do dokonywania rozliczeń za zużycie określonego medium, przykładowo naliczenia opłat za zużycie wody.

Dokładność wskazań danego urządzenia pomiarowego, determinowana przez jego parametry charakterystyczne takie jak błąd graniczny oraz rozdzielczość, jest tylko jednym z wielu czynników składających się na budżet niepewności pomiaru wykonanego z użyciem danego urządzenia w określonej instalacji i w określonych warunkach wykonywania pomiaru. W skład budżetu niepewności pomiarowej wchodzi ponadto składowe związane z rozkładem wielkości mierzonej (niepewność typu A  $u_a$ ) oraz składowe związane z dokładnością instalacji urządzenia pomiarowego i warunkami wykonywania pomiaru (składowe niepewności typu B  $u_b$ ). [13] [14] Do najważniejszych czynników determinujących użycie urządzenia pomiarowego należą możliwość montażu bez ingerencji w ciągłość pracy układu, wpływ na procesy zachodzące w układzie (bezinwazyjność) i czynniki ekonomiczne. [15] [16] Do pożądanych cech przepływomierzy zakwalifikować można [17] [18] [19] [2] [5] [20]:

- wysoka dokładność pomiaru - wysoka czułość i rozdzielczość,
- bezinwazyjność pracy urządzenia,
- bezkontaktowość,
- żywotność - długi czas pracy urządzenia,
- odporność na warunki środowiskowe / warunki pracy układu,
- niski koszt inwestycji oraz niskie koszty eksploatacyjne.

Na dokładność wskazań przepływomierza wpływ mają także czynniki zewnętrzne, do których należą: właściwości fizyczne i chemiczne medium, zniekształcenia geometryczne rurociągu, występowanie osadu wewnątrz rurociągu, elementy armatury zaburzające przepływ. Z tego też powodu pojawiają się ograniczenia dotyczące zastosowania urządzeń danego typu, w określonych warunkach, odbiegających od przyjętych i opisanych w aktach normatywnych (normy, instrukcje) warunków standardowych. Ze względu na fizyczną zasadę określania

wartosci wielkoscii mierzonej istnieją urządzenia bardziej i mniej podatne na zaburzenia przepływów i inne czynniki zewnętrzne przytoczone powyżej.

Urządzenia służące do pomiaru strumienia przepływu (masy lub objętości) możemy podzielić zasadniczo na dwie grupy ze względu na charakter pomiaru. Pierwsza grupa to przepływomierze służące do określenia chwilowej wartości strumienia przepływu. Należą do niej rurki spiętrzające, zwężki i kryzy pomiarowe, przepływomierze elektromagnetyczne, przepływomierze Coriolisa, przepływomierze termiczne, przepływomierze ultradźwiękowe.

Drugą grupę stanowią urządzenia pozwalające określić jedynie uśrednioną wartość strumienia przepływu w określonym czasie wykonywania pomiaru. Do tej grupy należą wszelkiego rodzaju liczniki przepływu, różniące się między sobą rozwiązaniami technicznymi pozwalającymi na ilościowe określenie przepływu.

Zróżnicowanie zagadnień pomiarowych znajduje odzwierciedlenie w szerokiej gamie rozwiązań konstrukcyjnych i zasad działania różnego typu przepływomierzy. Przyjmując jako kryterium podziału zjawisko fizyczne wykorzystywane do pomiaru przepływu płynu, możemy wyróżnić poszczególne rodzaje przepływomierzy wykorzystywane w pomiarach przemysłowych i technicznych. Do najważniejszych z nich należą: przepływomierze spiętrzające przepływ, przepływomierze elektromagnetyczne, przepływomierze ultradźwiękowe, przepływomierze bezwładnościowe, przepływomierze termiczne i przepływomierze wirowe.

W praktyce pomiarowej często spotykana jest sytuacja, w której zachodzi konieczność wykonania pomiarów porównawczych, wzorcowych czy gwarancyjnych. Szerokie zastosowanie w takich przypadkach ma technika ultradźwiękowa pomiaru przepływu. Głównymi zaletami tej metody pomiarowej jest wysoka dokładność bezinwazyjność, co wpływa na jej częste stosowanie. Przepływomierze ultradźwiękowe są urządzeniami przenośnymi, co pozwala na ich montaż w dowolnym, wybranym miejscu instalacji. Prowadzi to do zmniejszenia ilości urządzeń wykorzystywanych w opomiarowaniu instalacji przepływowej, a to z kolei przekłada się na zmniejszenie nakładów finansowych na proces pomiarowy.

Przepływomierze ultradźwiękowe z głowicami nakładanymi (clamp-on) są bardzo uniwersalne, ponieważ ich montaż na zewnętrznej powierzchni rurociągu nie ingeruje w funkcjonowanie instalacji i nie wymusza zatrzymywania jej pracy. Dokonywanie zatrzymań pracy instalacji w celu zamontowania urządzeń pomiarowych jest problematyczne dla jej posiadacza, ponieważ przestoje i przerwy w produkcji powodują straty finansowe. Istnieją branże, w których zatrzymanie i ponowne uruchomienie instalacji stanowi złożony proces technologiczny (np. zatrzymanie pracy bloku energetycznego i jego ponowny rozruch). Zastosowanie przepływomierzy ultradźwiękowych w takich przypadkach, przykładowo w celu kontroli poprawności wskazań przepływomierzy zamontowanych w instalacji, stanowi więc najprostszą, najtańszą, a często również najdokładniejszą formę dokonania pomiaru strumienia przepływu. W przypadku pomiarów przemysłowych istotne jest, aby używany przyrząd zapewniał pożądaną dokładność pomiaru przez określony, możliwie długi czas, co ogranicza nakłady inwestycyjne związane z wymianą opomiarowania instalacji. W tym aspekcie przepływomierze ultradźwiękowe cechują się utrzymywaniem swoich właściwości i charakterystyk pomiarowych, co wpływa na popularność i powszechność ich zastosowań

Istotną zaletą jest również uniwersalność metody ultradźwiękowej pomiaru w zakresie struktury medium, którego przepływ mierzymy. Przy użyciu metody ultradźwiękowej możliwy jest pomiar przepływów jednofazowych, lecz także przepływów dwufazowych. Z przepływami dwufazowymi spotykamy się często w obszarze energetyki (przepływ pary mokrej w rurociągu prowadzącym do turbiny), gospodarki wodnej (częściowe zanieczyszczenie cieczy obecnością innych substancji w oczyszczalniach ścieków), w przemyśle chemicznym/spożywczym (przepływ soku/syropu buraczanego w cukrowniach oraz przepływ jogurtu z cząsteczkami

owoców) czy też w przemyśle petrochemicznym (mieszanka frakcji ropy naftowej, mieszanka ropy naftowej z powietrzem).

Z wyżej wymienionych względów przepływomierze ultradźwiękowe są coraz powszechniej stosowane w przemysłowych rozwiązaniach pomiarowych, szczególnie tam, gdzie głównym kryterium ich zastosowania są możliwości techniczne wykonania pomiaru bezinwazyjnie i z określoną wysoką dokładnością. Istnieją też jednak ograniczenia w zastosowaniu metody ultradźwiękowej pomiaru przepływu. Przepływomierze ultradźwiękowe są wrażliwe na zaburzenia przepływu, które jak wcześniej zaznaczono mogą być powodowane przez elementy armatury bądź też osady na ściankach rurociągu. Następstwem tego jest konieczność zachowywania prostych odcinków rurociągu przed i za przeszkodą, która stanowi źródło zaburzeń. Wymagane odcinki proste rurociągu, których zachowanie niweluje wpływ zaburzenia wywołanego przez przeszkodę na rezultat pomiaru, są ściśle określone dla poszczególnych typów przeszkód w normach i instrukcjach obsługi danego urządzenia.

Zachowanie wspomnianych odcinków prostych przed i za źródłem zaburzenia w przypadku dużych instalacji i rurociągów o dużych średnicach stanowi dużą trudność. Przykładowo w przemyśle energetycznym stosuje się rurociągi o średnicy ponad 1m, chociażby rurociągi wody chłodzącej w skraplaczach turbin parowych. Problematyczne w takich przypadkach jest znalezienie prostych odcinków rurociągu o długości równej kilkunastu, kilkudziesięciu wielokrotnościom średnicy rurociągu. W takich przypadkach w celu skompensowania błędu pomiarowego, wywołanego zaburzeniami przepływu, konieczne jest wprowadzenie współczynnika korekcyjnego  $K$ . Jego wyznaczenie opiera się na znajomości lub dopasowaniu z odpowiednio wysoką dokładnością równania rozkładu prędkości opisującego dany przepływ.

Złożoność zagadnień przepływowych stanowi dużą trudność w wiernym opisie matematycznym badanego przepływu. Dopasowania równań opisujących rozkład prędkości przepływu rzeczywistego można dokonać w oparciu o teoretyczne równania rozkładów prędkości publikowane w publikacjach naukowych lub przy wykorzystywaniu modelowania matematycznego. Modelowanie zagadnień przepływowych często wykonuje się wykorzystując oprogramowanie CFD. [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27] Metodą pomiarową pozwalającą określić punktowe wartości prędkości, poznać charakter przepływu oraz rozkład prędkości jest anemometria laserowa. Wspomniana technika pomiarowa jest jednak bardzo złożona, co przejawia się w kosztach aparatury pomiarowej i czasochłonności procesu pomiarowego.

Wyznaczenie wartości, bądź też równania opisującego współczynnik korekcyjny przepływu  $K$  (w późniejszej części pracy będzie używane pojęcie współczynnika kształtu rozkładu prędkości, ponieważ dokładność pomiaru zależy głównie od rozkładu prędkości), pomimo swojej złożoności i konieczności przyjęcia pewnych założeń upraszczających zagadnienie przepływowe, może stanowić metodę kompensacji błędu pomiarowego w przypadku pomiaru strumienia przepływu metodą ultradźwiękową w niestandardowych warunkach dokonywania pomiaru. W przypadku niektórych zagadnień pomiarowych takie rozwiązanie może być jedyną metodą przeprowadzenia procesu badawczego.



## 2. Analiza zagadnień i teza prac

Rozprawa doktorska dotyczy zagadnienia wykonywania pomiarów przepływu z użyciem techniki ultradźwiękowej. Głównym zakresem zainteresowań badawczych jest metrologiczne ujęcie badań wykonywanych w niestandardowych warunkach pomiaru tj. bez zachowania wymaganych w normach odcinków prostych rurociągów. Przepływomierze ultradźwiękowe z uwagi na bezinwazyjność i uniwersalność zastosowań są szeroko wykorzystywane do pomiarów kontrolnych, wzorcowych czy też gwarancyjnych. Zachowanie określonych w wymaganiach technicznych i aktach normatywnych prostych odcinków rurociągu przed i za przeszkodą (np. w postaci armatury instalacji: kolan hydraulicznych, zaworów, przepustnic) jest bardzo często niemożliwe. Zaznaczyć jednak trzeba, że dokonanie pomiaru przy użyciu przepływomierza ultradźwiękowego jest w takich przypadkach często jedynym rozwiązaniem na wykonanie pomiaru bez konieczności zatrzymywania pracy instalacji i ingerencji w strukturę rurociągu. Konieczność przeprowadzenia badań i rozważań nad zastosowaniem metody ultradźwiękowej przy pomiarach w niestandardowych odległościach za elementem zaburzającym w postaci zasowy nożowej poparta jest realnie występującym problemem w praktyce pomiarowej. Wyznaczenie współczynnika korekcyjnego  $K$ , kompensującego błąd pomiarowy w opisanym powyżej przypadku pomiarowym może prowadzić do opracowania uniwersalnej metody kompensacji błędów pomiarowych w pomiarach przepływomierzem ultradźwiękowym za różnego typu elementami instalacji zaburzającymi przepływ. Zagadnienie to w ujęciu badań prowadzonych za przeszkodami w postaci kolana hydraulicznego [22] [28] [29] [30] [31], przepustnicy [32] [33], zasowy nożowej poruszane było w pracy magisterskiej autora oraz w rozprawie doktorskiej członka Katedry Techniki Ciepłej Piotra Synowca oraz w publikacjach członków Katedry Techniki Ciepłej w czasopiśmie polskich i zagranicznych, w których autor niniejszej rozprawy jest współautorem. [34] [35] [32] [29] [36] [30] [37] [31] [38] [39] [40]

Wieloletnie prace badawcze, zwieńczone wieloma publikacjami i opracowaniami naukowymi, w temacie użycia przepływomierzy ultradźwiękowych w różnych sytuacjach pomiarowych prowadził S. Waluś. [41] [42] [18] [43] [44] [45] [19] [46] [17] [47] [48] [49] [50] [51] [52] [53] [54] [55] [56] W ostatnich latach w międzynarodowej literaturze przedmiotu pojawiło się wiele publikacji dotyczących zagadnienia użycia przepływomierzy ultradźwiękowych. Świadczy to o popularności oraz powszechności badań wykonywanych przy użyciu techniki ultradźwiękowej pomiaru przepływu. Zajmowanie się tym zagadnieniem przez autorów na przestrzeni kilkudziesięciu lat świadczy o złożoności badanego problemu i jego istotności dla metrologii oraz praktyki pomiarowej. Rezultaty wykonywanych badań mogą zostać zaimplementowane w przemysłowych rozwiązaniach pomiarowych.

## **2.1 Teza pracy**

W niniejszej rozprawie doktorskiej postawiono dwie tezy, mające charakter uniwersalny. Pierwsza z nich (2.1.1) dotyczy kompensacji błędu pomiarowego wykonanego w warunkach niestandardowych. Druga teza (2.1.2) dotyczy wyboru optymalnego miejsca do wykonania pomiarów przy użyciu przepływomierza ultradźwiękowego.

### **2.1.1 Kompensacja błędu pomiaru w warunkach niestandardowych**

Analiza modeli matematycznych rozkładów prędkości przepływu turbulentnego o zniekształconym profilu prędkości umożliwia wyznaczenie współczynnika korekcyjnego  $K$  dla przepływomierza ultradźwiękowego. Wyznaczenie współczynnika korekcyjnego  $K$  pozwala na kompensację błędu pomiaru w przypadku pomiarów wykonanych za elementem zaburzającym rozkład prędkości przepływu w postaci zasuwę nożowej.

### **2.1.2 Identyfikacja optymalnego punktu pomiarowego**

Istnieje miejsce na rurociągu, w odległości od zasuwę nożowej mniejszej niż określona w normach i zaleceniach, dla którego błąd pomiaru przepływomierzem ultradźwiękowym jest mniejszy niż błąd graniczny używanego przepływomierza.

## **2.2 Cel pracy**

- Głównym celem pracy doktorskiej była analiza metrologiczna i studium możliwości zastosowania przepływomierza ultradźwiękowego za zasuwę nożową, w odległościach mniejszych niż przewidziane w normach. Do głównych zadań badawczych należało wyznaczenie błędów wskazań przepływomierza ultradźwiękowego w różnych odległościach za zasuwę nożową i przy różnych ustawieniach głowic ultradźwiękowych. Finalnym efektem przeprowadzonej analizy metrologicznej było wskazanie miejsc (określenia odległości od zasuwę i kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych przepływomierza) dla których błąd pomiaru jest najmniejszy.
- Badania doświadczalne prowadzone przy użyciu przepływomierzy ultradźwiękowych oraz anemometru laserowego miały na celu wyznaczenie współczynnika korekcyjnego  $K$  kompensującego błąd pomiarowy spowodowany zaburzeniem wywołanym przez zasuwę nożową.
- Celem wyznaczenia wartości współczynnika korekcyjnego  $K$  dla modeli teoretycznych rozkładu prędkości było porównanie z danymi pomiarowymi i weryfikacja ich poprawności.

## **2.3 Zakres pracy**

Przygotowanie stanowiska pomiarowego i późniejsze wykonanie pracy badawczej zostało poprzedzone przeglądem literatury dotyczącej zasady działania i zastosowań przepływomierzy ultradźwiękowych, zagadnień metrologicznych związanych z pomiarami przepływu oraz literatury z zakresu mechaniki płynów oraz matematycznego ujęcia zagadnień przepływowych, w tym zastosowania modelowania matematycznego do ich rozwiązywania. Następnie zostały wykonane prace adaptujące zbudowane przez dr inż. Piotra Synowca stanowisko badawcze do wykonywania pomiarów przy zastosowaniu przepływomierza ultradźwiękowego za elementem zaburzającym przepływ w postaci zasuwę nożowej.

Część eksperymentalna pracy związana była z wykonaniem pomiarów przepływu za zasuwą nożową, w odległościach mniejszych od zasuw niż określone w normach. Badania wykonano w zakresie odległości  $3D - 15D$  (tj. w odległości równej od 3 do 15 średnic rurociągu). Wielkością, której wartości były rejestrowane była prędkość przepływu. W celach późniejszego wyznaczenia wartości współczynnika korekcyjnego  $K$ , równocześnie dokonywano pomiaru prędkości przepływu przed zasuwą nożową, w odległości zgodnej z określoną w normach. Pomiary przeprowadzone zostały dla przepływów o 2 różnych wartościach liczby Reynoldsa: 35 000 i 70 000.

Po opracowaniu wyników pomiarów wykonanych przy użyciu przepływomierzy ultradźwiękowych wyznaczono rzeczywiste wartości współczynnika korekcyjnego  $K_{rz}^*$ . Rezultaty tych obliczeń zestawiono następnie z wartościami współczynnika korekcyjnego  $K^*$  wyznaczonymi dla wybranych spośród literatury modeli rozkładów prędkości zniekształconego przepływu turbulentnego. W celu graficznej obserwacji zjawisk przepływowych i ich późniejszej analizy wykonane zostały badania przy użyciu anemometrii laserowej. Badania zostały przeprowadzone przy odtworzeniu warunków wcześniejszych pomiarów wykonanych przy użyciu przepływomierza ultradźwiękowego. Analiza metrologiczna otrzymanych rezultatów badań i obliczeń stanowi podsumowanie wykonanych prac.

### 3. Pomiar strumienia przepływu

#### 3.1 Podział metod pomiaru strumienia przepływu

Zjawisko przepływu płynu jest złożonym zjawiskiem dotyczącym zmian położenia cząstek w czasie. Przepływ ma charakter przestrzenny, co implikuje trudności i ograniczenia przy określeniu wartości przepływu. Przy ilościowym określeniu przepływu posługujemy się takimi wielkościami jak strumień objętości przepływu i strumień masy przepływu. Jako strumień płynu definiujemy ilość płynu przepływającą przez obszar kontrolny (przekrój pomiarowy) w określonym czasie. W przypadku określania ilości płynu jako masy płynu mówimy o strumieniu masy przepływu  $q_m$ , a w przypadku określania ilości płynu jako objętości mówimy o strumieniu objętości przepływu  $q_v$ . [57] [58] [59] [60] [61] [62]

Na określenie wielkości przepływu wpływ mają liczne parametry fizyczne, a do najważniejszych z nich należą: ciśnienie, temperatura, lepkość oraz gęstość płynu. W dalszej części pracy zostaną przywołane podstawowe prawa z dziedziny fizyki i mechaniki płynów pozwalające w sposób przybliżony zapisem matematycznym opisać przepływ rzeczywisty, odbywający się w określonych warunkach. W ujęciu metrologicznym pomiary przepływu płynu możemy podzielić na pomiary wykonywane w kanałach otwartych i w kanałach zamkniętych. W niniejszej rozprawie doktorskiej zagadnienie pomiaru przepływu zostanie ograniczony jedynie do kanałów zamkniętych, w których jednym z elementów instalacji jest zawór w postaci zasuwki nożowej.

Pomiary przepływu należą do grupy najtrudniejszych pomiarów w przemysłowej praktyce pomiarowej. [2] [3] [5] [6] Do ich poprawnego wykonania i prawidłowego użycia przyrządu pomiarowego zgodnie z jego charakterystyką potrzebne jest spełnienie wielu warunków. Jednym z najważniejszych uwarunkowań aplikacyjnych przepływomierzy jest całkowite wypełnienie rurociągu płynem w całym przekroju pomiarowym. Kolejnym z warunków, które powinny być spełnione w celu wykonania pomiaru z dokładnością równą możliwościom pomiarowym przepływomierza jest zapewnienie niezmiennego, niezaburzonego profilu prędkości przepływu. Warunek ten realizuje się w praktyce poprzez minimalizację liczby elementów zaburzających przepływ i zapewnienie przed i za tymi elementami prostych odcinków rurociągu odpowiedniej długości. W zależności od rodzaju elementu hydraulicznego stanowiącego przeszkodę zaburzającą przepływ, wymagane są odcinki proste o różnych długościach. Umieszczenie takich elementów jak kolana hydrauliczne, zawory, przepustnice, czy zwężki zbyt blisko przekroju pomiarowego/miejsca montażu przepływomierza) może generować znaczące błędy, które należałoby uwzględnić w budżecie niepewności pomiarowej.

Mnogość problemów i związanych z ich rozwiązaniem wymagań normatywnych przekłada się na różnorodność metod pomiaru strumienia i prędkości przepływu. Podziału przepływomierzy dokonuje się najczęściej stosując jako kryterium podziału fizyczną zasadę działania i zastosowane przez producenta rozwiązania techniczne. Dokonując przeglądu literaturowego ujęto przy klasyfikowaniu typów przepływomierzy urządzenia będące w seryjnej produkcji i powszechnie stosowane w przemysłowych pomiarach przepływowych. Oprócz nich istnieją przepływomierze specjalnego przeznaczenia, projektowane i wykonywane pod kątem szczególnych uwarunkowań aplikacyjnych.

Wśród przepływomierzy możemy wyróżnić następujące grupy:

- Spiętrzające przepływ (zweźkowe, sondy piętrzące, rurki spiętrzające)
- Elektromagnetyczne
- Bezwładnościowe (Coriolisa)
- Pływakowe (rotametry)
- Ultradźwiękowe
- Wirowe
- Termiczne
- Turbinowe
- Komorowe
- Inne

### **3.2 Metoda ultradźwiękowa pomiaru strumienia przepływu**

Przepływomierze ultradźwiękowe to przyrządy pomiarowe wykorzystujące w celu wyznaczenia strumienia przepływu zjawisko rozchodzenia się fal ultradźwiękowych. Fala ultradźwiękowa jest w fizycznym opisie mechanicznym zjawiskiem falowym, znajdującym się poza zakresem słyszalności człowieka. [63] [64] [65] [66] Częstotliwość fali ultradźwiękowych mieści się w zakresie  $10^4$  Hz –  $10^9$  Hz. Rozchodzenie się fal ultradźwiękowych opiera się na tych samych prawach fizycznych, jakie pozwalają opisać zjawisko rozchodzenia się dźwięków słyszalnych. Mierzalne wielkości parametrów pola ultradźwiękowego, takie jak bardzo mała długość fali i wysokie natężenie fal ultradźwiękowych, wyróżniają je wśród innych fal akustycznych. [64] Specyficzne właściwości fal ultradźwiękowych sprawiają, że znajdują one szeroką gamę zastosowań. Do najważniejszych przykładów użycia techniki ultradźwiękowej należą:

- a) Biomedycyna i diagnostyka medyczna – własności fal ultradźwiękowych używane są do obrazowania diagnostycznego: ultrasonografia i tomografia ultradźwiękowa. Technika ultradźwiękowa stosowana jest także w celach terapeutycznych, głównie terapiach termicznych (hipertermia, termoablacja)
- b) Przemysłowa technika pomiarowa – ultradźwięki znajdują zastosowania w różnorodnych procesach pomiarowych. Do najważniejszych z nich należą: defektoskopia ultradźwiękowa, mikroskopia ultradźwiękowa czy ultradźwiękowy pomiar przepływów.
- c) Czyszczenie ultradźwiękowe
- d) Technika sonarowa

Istotą działania przepływomierzy ultradźwiękowych jest zjawisko odbicia fali ultradźwiękowej. Wśród fal ultradźwiękowych wyróżniamy fale podłużne, fale poprzeczne, fale powierzchniowe, fale skrętne, fale dylatacyjne. Rodzaj fali determinowany jest właściwościami środowisk, w których następuje ich propagacja. W gazach i cieczach występuje jedynie sprężystość objętościowa, dlatego w tych ośrodkach rozchodzą się tylko fale podłużne. W ciałach stałych wyróżniamy sprężystość objętościową oraz sprężystość postaciową (poprzeczną), dlatego w ciałach stałych rozchodzą się zarówno fale podłużne, jak i fale poprzeczne. W przepływomierzach ultradźwiękowych wykorzystywane są fale poprzeczne i fale podłużne. [64] [66] [67] [68] Przy pomiarach wykonywanych na rurociągach mamy do czynienia z przejściem fali ultradźwiękowej przez 2 różne ośrodki: medium przepływające przez rurociąg oraz przez materiał ścian rurociągu. Na granicy ośrodków fala ulega załamaniu zgodnie z prawem Snelliusa. W medium rozchodzi się jedynie fala podłużna, natomiast w ściankach rurociągu rozchodzą się zarówno fale podłużne, jak i poprzeczne.

Wśród samych przepływomierzy ultradźwiękowych z uwagi na sposób detekcji właściwości fali ultradźwiękowej wyróżnia się dwa zasadnicze rodzaje: przepływomierze ultradźwiękowe typu transit-time oraz przepływomierze ultradźwiękowe serii Dopplera. [69] [70] [71]

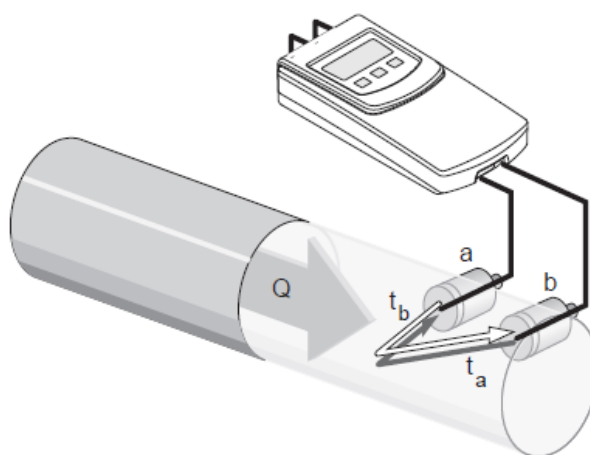
### 3.2.1 Przepływomierze ultradźwiękowe serii Dopplera

Przepływomierze ultradźwiękowe wykorzystujące w swoim działaniu efekt Dopplera [72] [17] stosowane są do pomiarów przepływu w rurociągach wykonanych z metalu lub tworzywa sztucznego, całkowicie wypełnionych cieczą o określonej wartości napowietrzenia i frakcji ciał stałych zawieszonych w cieczy. Podobnie jak w przypadku przepływomierzy typu transit-time możliwy jest ich bezinwazyjny montaż na instalacji rurociągowej. Inna jest natomiast zasada działania tych przepływomierzy. Wysyłane przez nadajnik fale ultradźwiękowe odbijają się od cząstek ciał stałych zawieszonych w cieczy i docierają do czujnika, który pełni funkcję odbiornika. Fale odbijające się od cząstek ciał stałych mają częstotliwość przesuniętą względem początkowej częstotliwości nadawanego sygnału, zgodnie z efektem Dopplera. Różnica częstotliwości, które zależy od prędkości poruszających się cząstek ciał stałych lub pęcherzyków powietrza, przeliczana jest przez przetwornik na wartości prędkości przepływu i strumienia przepływu, w sposób analogiczny jak różnica czasu przejścia fali w przypadku przepływomierzy typu transit-time.

$$v = \frac{c \cdot \Delta f}{2f \cdot \cos \alpha} \quad (3.1)$$

### 3.2.2 Przepływomierze ultradźwiękowe typu transit-time

Przepływomierze typu transit time [17] [73] [74] [75] [76] [77] (rys. 3.1) są stosowane przy wykonywaniu pomiarów przepływu czystych cieczy oraz cieczy, które zawierają niewielkie ilości ciał stałych lub pęcherzyków powietrza. Istnieją dwa rodzaje przepływomierzy ultradźwiękowych typu transit-time: przepływomierze montowane w rurociąg (typu in-line) oraz przepływomierze z głowicami nakładanymi na rurociąg (typu clamp-on). [78] [30] [79] Wśród przepływomierzy stacjonarnych in-line można wyróżnić rozwiązania jednokanałowe lub wielokanałowe.



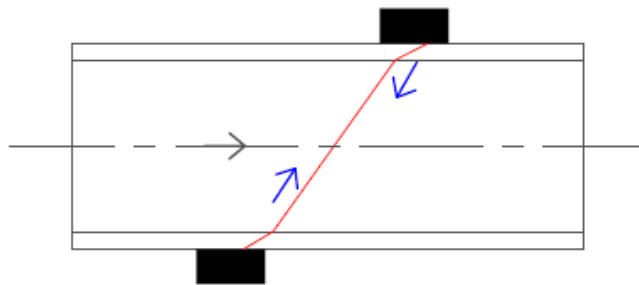
Rys. 3.1. Schemat działania przepływomierza ultradźwiękowego typu transit-time ( $Q$  – strumień przepływu,  $a, b$  – głowice ultradźwiękowe,  $t_a, t_b$  – czas przejścia fali ultradźwiękowej pomiędzy głowicami) [80]

Wielką zaletą przepływomierzy typu clamp-on jest bezinwazyjność pomiaru, gdyż sondy przepływomierza montowane są na rurociągu, w którym odbywa się przepływ. [80] [81] [82] Możliwe są różne konfiguracje wzajemnego położenia czujników, co daje użytkownikom urządzenia swobodę w wykonywaniu pomiarów. Jest to duża zaleta, zwłaszcza w przypadkach, gdy miejsce przeznaczone na montaż czujników jest ograniczone. Wybór lokalizacji sond zależy więc od właściwości rurociągu, a także od właściwości cieczy.

Zamontowane na rurociągu (clamp-on) lub w rurociągu (in-line) czujniki działają na zasadzie nadajnika i odbiornika fali ultradźwiękowej. Ponieważ fala ultradźwiękowa przemieszcza się szybciej z kierunkiem przepływu płynu niż w kierunku przeciwnym, występuje różnica w czasie ich przejścia ( $\Delta t$ ). Kiedy przepływ jest zerowy, różnica czasu ( $\Delta t$ ) wynosi 0. Na podstawie znanej różnicy w czasach przejścia wiązki wysyłanej i odbieranej przetwornik oblicza, przy wykorzystaniu odpowiednich wzorów, prędkość przepływu oraz objętość przepływającej cieczy.

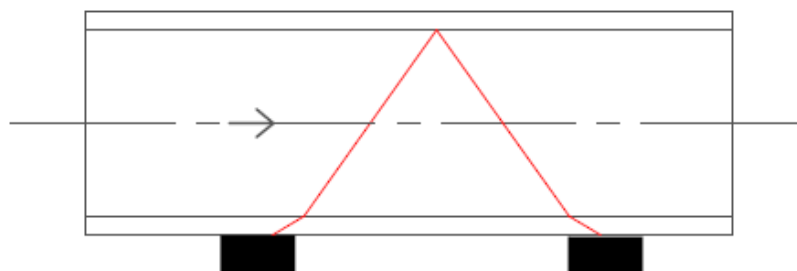
Możliwe jest rozmieszczenie głowic nakładanych na rurociąg (clamp-on) w różnych konfiguracjach (Rys. 3.2 – 3.4):

- „Z” – pojedyncza ścieżka przejścia fali ultradźwiękowej; preferowana do zastosowania w rurociągach o dużej średnicy [78] [54]



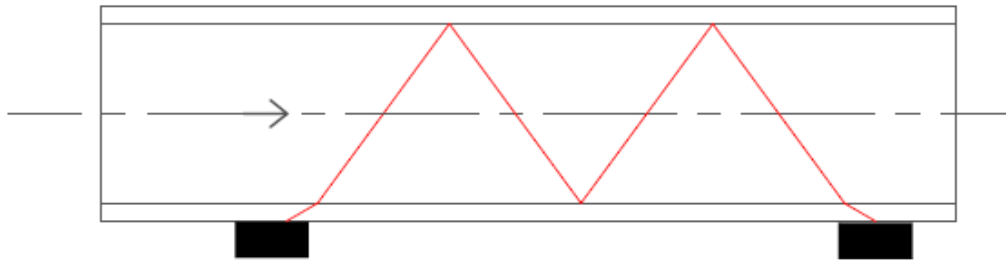
Rys. 3.2. Schemat pomiaru prędkości przepływomierzem ultradźwiękowym w układzie głowic typu Z.

- „V” - podwójna ścieżka przejścia fali ultradźwiękowej; wydłużona droga fali ultradźwiękowej dla zwiększenia dokładności pomiaru w rurociągach o małych średnicach [78]



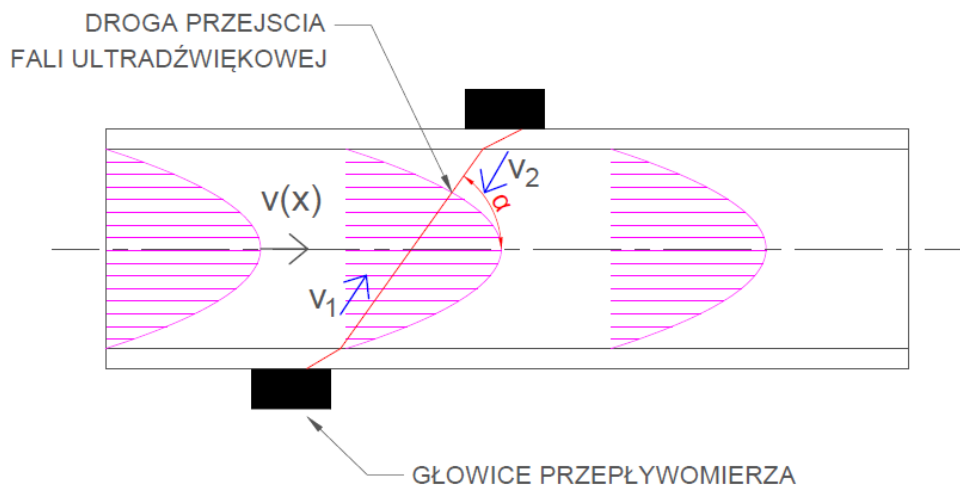
Rys. 3.3. Schemat pomiaru prędkości przepływomierzem ultradźwiękowym w układzie głowic typu V.

- „W” – poczwórna ścieżka przejścia fali ultradźwiękowej; wydłużona droga fali ultradźwiękowej dla zwiększenia dokładności pomiaru; w rurociągach o małych średnicach.



Rys. 3.4. Schemat pomiaru prędkości przepływomierzem ultradźwiękowym w układzie głowic typu W.

Niniejsza rozprawa doktorska dotyczy zastosowania przepływomierza ultradźwiękowego typu transit-time z głowicami nakładanymi (clamp-on) za przeszkodą w postaci zasuwy nożowej. W nawiązaniu do tematu rozprawy i używanych w trakcie prac badawczych przepływomierzy typu transit-time, poniżej zostanie szczegółowo przedstawione wyprowadzenie zależności (równania przetwarzania) pozwalającej wyznaczyć metodą ultradźwiękową wartość strumienia objętości przy ustawieniu głowic przepływomierza typu Z. Dokonanie zmian w kluczowym założeniu dotyczącym drogi przejścia fali ultradźwiękowej pozwoli na uzyskanie finalnej zależności opisującej strumień objętości przepływu także dla metod typu V i W.



Rys. 3.5. Schemat pomiaru prędkości przepływomierzem ultradźwiękowym w układzie głowic ultradźwiękowych typu Z przy ustabilizowanym rozkładzie prędkości..

Zgodnie z rys. 3.5 prędkość fali ultradźwiękowej w kierunku zgodnym z przepływem jest równa (3.2)

$$v_1 = c + v(x) \cos\alpha \quad (3.2)$$

a w kierunku przeciwnym (3.3)



$$v_2 = c - v(x) \cos\alpha \quad (3.3)$$

Czasy przejścia fali ultradźwiękowej z prądem (z pkt. A do pkt. B) oraz pod prąd przepływu (z pkt. B do pkt. A) są równe odpowiednio (3.4) i (3.5).

$$t_1 = \int_0^l \frac{dx}{c + v(x) \cos\alpha} + \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{c_i} dx \quad (3.4)$$

$$t_2 = \int_0^l \frac{dx}{c - v(x) \cos\alpha} + \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{c_i} dx \quad (3.5)$$

Pomiar czasów  $t_1$  i  $t_2$  pozwala na wyznaczenie różnicy czasów przejścia fali ultradźwiękowej (3.6), co stanowi podstawę wyznaczenia średniej prędkości przepływu.

$$\begin{aligned} \Delta t = t_2 - t_1 &= \int_0^l \frac{dx}{c - v(x) \cos\alpha} + \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{c_i} dx \\ &- \left( \int_0^l \frac{dx}{c + v(x) \cos\alpha} + \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{c_i} dx \right) = \int_0^l \frac{2 v(x) \cos\alpha}{c^2 - v(x)^2 \cos^2\alpha} dx \end{aligned} \quad (3.6)$$

Równanie to można przekształcić do postaci (3.7)

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \int_0^l \frac{2 v(x) \cos\alpha}{c^2 \left( 1 - \frac{v(x)^2}{c^2} \cos^2\alpha \right)} dx \quad (3.7)$$

Z uwagi na fakt, że wartość prędkości przepływu jest znikoma w odniesieniu do wartości prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej składnik  $\frac{v(x)^2}{c^2}$  jest pomijalnie mały (3.8)

$$v(x) \ll c \Rightarrow \frac{v(x)^2}{c^2} \rightarrow 0 \quad (3.8)$$

Stąd różnicę czasów przejścia fali ultradźwiękowej możemy zapisać jako (3.9)

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2 \cos\alpha}{c^2} \int_0^l v(l) dl \quad (3.9)$$

Przy kolejnych przekształceniach wzoru (3.10) – (3.13) wykorzystano zależność prędkości w funkcji drogi przejścia fali ultradźwiękowej  $v(x)$  od prędkości średniej po średnicy rurociągu  $v(D)$ .

$$\frac{2\cos\alpha}{c^2} \int_0^l v(x) dx = \frac{2\cos\alpha}{c^2} \int_0^D v(r) dr \quad (3.10)$$

$$\frac{2\cos\alpha}{c^2} \int_0^l v(x) dx = \frac{2\cos\alpha}{c^2} \int_0^D v(r) dr = \frac{2\cos\alpha}{c^2} \cdot v(D) \cdot D \quad (3.11)$$

$$v_D = v(D) = \frac{1}{D} \int_0^D v(r) dr \quad (3.12)$$

$$v(x) = v(D) \cdot D \quad (3.13)$$

Prędkość średnia po średnicy rurociągu  $v(D)$  powiązana jest zależnością liniową ze strumieniem objętości przepływu zgodnie ze wzorem wyrażającym równanie ciągłości przepływu (3.14)

$$q_v = A \cdot v \quad (3.14)$$

$$v = \frac{q_v}{A} \quad (3.15)$$

Użycie przepływomierza ultradźwiękowego do pomiaru strumienia objętości przepływu, jak już wcześniej wspomniano, bazuje na pomiarze prędkości średniej po drodze przejścia fali ultradźwiękowej, tj. po drodze między głowicami przepływomierza. Kluczowe z punktu widzenia oceny dokładności pomiaru jest wyznaczenie współczynnika zależnego od rozkładu prędkości w rurociągu. Współczynnik ten nosi nazwę współczynnika kształtu rozkładu prędkości  $K$  i definiowany jest jako stosunek prędkości średniej w przekroju rurociągu  $v_s$  i prędkości średniej po średnicy rurociągu  $v_D$  (3.16).

$$K = \frac{v_s}{v_D} \quad (3.16)$$

Prędkość średnia w przekroju rurociągu zapisujemy jako (3.17)

$$v_s = \frac{1}{S} \int_S v dS \quad (3.17)$$

Stąd współczynnik kształtu rozkładu prędkości  $K$  zapisujemy jako (3.18)

$$K = \frac{\frac{1}{S} \int_S v dS}{\frac{1}{D} \int_0^D v dx} \quad (3.18)$$

W dalszej części pracy powyższa zależność będzie rozpatrywana dla różnych rozkładów prędkości przepływu zaburzonego.

Przekształcając dalej wzór otrzymujemy wyrażenie (3.19)

$$\Delta t = \frac{2 \cos \alpha}{c^2} \cdot v(D) \cdot D \quad (3.19)$$

Dokonujemy przekształcenia wzoru (3.16) otrzymując wzór (3.20), dokonując kolejnych podstawień we wzorach (3.20), (3.21) i (3.22)

$$v_D = \frac{v_s}{K} \quad (3.20)$$

$$\Delta t = \frac{2 \cos \alpha}{c^2} \cdot \frac{v_s}{K} \cdot D \quad (3.21)$$

$$\Delta t = \frac{2 \cos \alpha}{c^2} \cdot \frac{q_v}{K \cdot A} \cdot D \quad (3.22)$$

Rozpatrujemy przewód o przekroju kołowym (3.23)

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.23)$$

Po podstawieniu wzór (3.22) przyjmuje postać (3.25)

$$\Delta t = \frac{2 \cos \alpha}{c^2} \cdot \frac{4 \cdot q_v}{K \cdot \pi \cdot D^2} \cdot D \quad (3.24)$$

$$\Delta t = \frac{2 \cos \alpha}{c^2} \cdot \frac{4 \cdot q_v}{K \cdot \pi \cdot D} \quad (3.25)$$

Finalnie strumień objętości zmierzony przy użyciu przepływomierza ultradźwiękowego przy ustawieniu głowic ultradźwiękowych w układzie Z wyraża się wzorem (3.26)

$$q_{v-ukł Z} = \frac{\Delta t \cdot c^2 \cdot K \cdot \pi \cdot D}{4 \cdot 2 \cos \alpha} = \frac{\Delta t \cdot c^2 \cdot K \cdot \pi \cdot D}{8 \cos \alpha} \quad (3.26)$$

Analogicznie należałoby wyprowadzić zależności opisujące strumień objętości przy innym położeniu głowic ultradźwiękowych. Należy uwzględnić, że w ustawieniu głowic w układzie V droga przejścia fali ultradźwiękowej jest 2 razy dłuższa niż w układzie Z (3.27). W przypadku ustawienia głowic w układzie W droga przejścia fali ultradźwiękowej jest 4 razy dłuższa niż w układzie Z (3.28).

$$q_{v-ukłV} = \frac{2 \cdot \Delta t \cdot c^2 \cdot K \cdot \pi \cdot D}{4 \cdot 2 \cos \alpha} = \frac{\Delta t \cdot c^2 \cdot K \cdot \pi \cdot D}{4 \cos \alpha} \quad (3.27)$$

$$q_{v-ukłW} = \frac{4 \cdot \Delta t \cdot c^2 \cdot K \cdot \pi \cdot D}{4 \cdot 2 \cos \alpha} = \frac{\Delta t \cdot c^2 \cdot K \cdot \pi \cdot D}{2 \cos \alpha} \quad (3.28)$$

### 3.2.3 Przepływomierze ultradźwiękowe wielodrogowe

Szeroki wachlarz typów przepływomierzy ultradźwiękowych oraz rozwiązań montażowych pozwala dobrze dobrać przepływomierz do konkretnej instalacji przepływowej, zgodnie z przeznaczeniem danych pomiarowych. W przypadkach, gdy wymagana jest bardzo wysoka dokładność pomiaru, wyższa niż przy zastosowaniu przepływomierzy z głowicami nakładanymi, stosuje się przepływomierze wielodrogowe. [83] [84] [85] [86] [49] [87] [88] [89] [90] Przepływomierze te wmontowane są na stałe w rurociąg z określonym geometrycznym ustawieniem głowic. Zastosowanie wielokrotnego przejścia fali pozwala zwiększyć dokładność pomiarową, ponieważ zwiększenie liczby dróg przejścia fali ultradźwiękowych minimalizuje wpływ rozkładu prędkości na rezultat pomiaru (zarówno dla przepływów osiowo symetrycznych, jak i przepływów o zaburzonym rozkładzie prędkości). Zgodnie z [17] stosowanie większej liczby dróg niż 5 jest bezcelowe z powodu większych kosztów przepływomierza. Przepływomierze znajdują zastosowanie m.in. w elektrociepłowniach i w instalacjach wodociągowych.

Strumień objętości wyznacza się ze wzoru (3.29), gdzie  $K_{li}$  są współczynnikami kształtu rozkładu prędkości w  $i$ -tej drodze.

$$q_{v\ wd} = \pi \cdot r^2 \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N K_{li} \cdot v_{li} \quad (3.29)$$

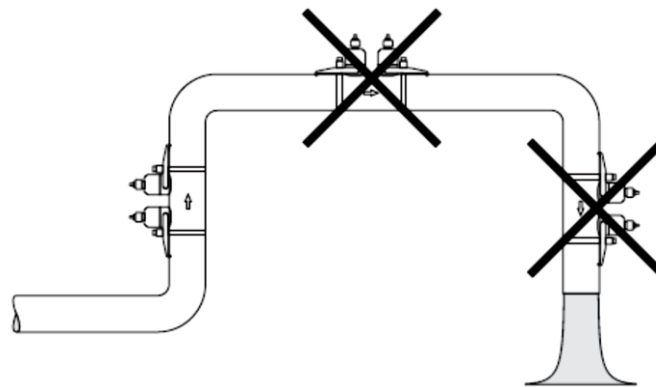
### 3.3 Zastosowanie przepływomierzy ultradźwiękowych w praktyce pomiarowej.

Przepływomierze ultradźwiękowe są powszechnie stosowane w praktyce pomiarowej ze względu na swoją uniwersalność. Przepływomierze znajdują zastosowanie zarówno przez pomiarze przepływów jednofazowych cieczy i gazów (przepływomierze typu transit-time), jak i przy pomiarze przepływów dwufazowych (przepływomierze serii Dopplera). Przepływomierze występują w szerokiej gamie specyfikacji. Pozwala to na ich zastosowanie:

- W przewodach o średnicy nominalnej DN 10 – DN 2500 ( w szczególnych wariantach do DN 4000 przy rurociągach stalowych i betonowych)
- Przy zakresie strumienia objętości 0,08 – 100 000 m<sup>3</sup>/h w przypadku cieczy oraz 10-40 000 m<sup>3</sup>/h w przypadku gazów
- Przy ciśnieniu do 16 MPa
- Przy temperaturze do 250 °C

Niepewność pomiaru zależna jest od typu przepływomierza. W przypadku przepływomierzy wykorzystujących w swoim działaniu efekt Dopplera możliwa do osiągnięcia niepewność pomiaru wynosi 1,5% zakresu pomiarowego. W przypadku przepływomierzy wielodrogowych typu transit-time niepewność pomiaru sięga 0,3% - 0,5% wartości aktualnej strumienia przepływu, a w przypadku przepływomierzy jednodrogowych typu transit-time osiągalna niepewność pomiaru znajduje się w przedziale 1,5% - 2%. Ponadto należy uwzględnić, że dokładność pomiaru zależy od rozkładu prędkości za elementami ingerującymi w przepływ i powodującymi jego zaburzenia, takimi jak armatura hydrauliczna. [81] [82]

Zachowanie deklarowanych przez producenta sprzętu pomiarowego dokładność można osiągnąć przy spełnieniu określonych warunków takich jak całkowite wypełnienie przekroju rurociągu płynem, brak osadów, gładkość hydrauliczna ścian rurociągu, zachowanie prostych odcinków rurociągu przed i za miejscem montażu przepływomierza. Wytyczne i zalecenia dotyczące zastosowań przepływomierzy ultradźwiękowych znajdują się w aktach normatywnych PN i ISO [91] [92] [93]. Zalecenia odnoszą się do sposobu montażu urządzeń i definiują odcinki proste rurociągu za i przed przeszkodą oraz akceptowalne sposoby montażu.



Rys. 3.6. Zalecenia producenta dotyczące dozwolonych sposobów montażu głowic ultradźwiękowych [82]

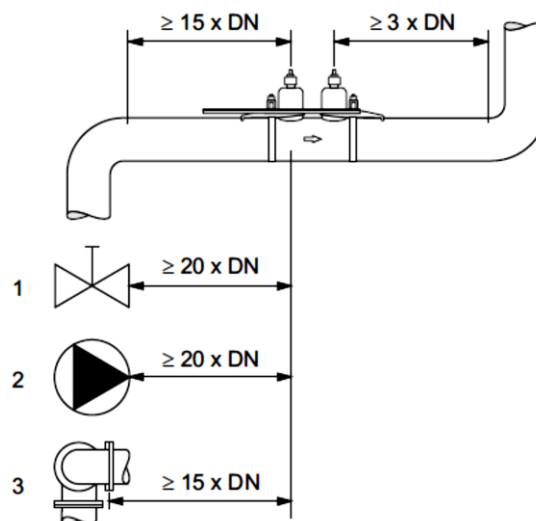
Zgodnie z rys. 3.6 dozwolonymi sposobami montażu jest umieszczenie głowic przepływomierza na rurociągu o wznoszącym kierunku przepływu na rurach, lecz także ukośnych. W przypadku montażu na odcinkach poziomych należy zwracać uwagę, aby w górnej części przekroju rurociągu nie powstawały korki powietrzne. Należy zwracać uwagę na całkowite wypełnienie rurociągu płynem i na unikanie rozwarstwienia lub przerwania strugi, co może spowodować na przykład przedstawiony na rys. 3.6. montaż na pionowym, opadającym odcinku rurociągu zakończonym swobodnym wypływem płynu.

Do najważniejszych zalet przepływomierzy ultradźwiękowych oprócz wysokiej dokładności pomiaru i dużej uniwersalności zastosowań (szeroki zakres pomiarowy oraz szeroki zakres średnic rurociągu) należy bezinwazyjność. Jest to istotna przewaga nad innymi przyrządami pomiarowymi takimi jak zwężki pomiarowe, przepływomierze kolanowe, przepływomierze wirowe czy inne przepływomierze montowane na stałe w rurociągu. Ich montaż, bądź późniejsza konserwacja, wymaga ingerencji w strukturę instalacji przepływowej i najczęściej przerwania pracy tej instalacji. Przepływomierze ultradźwiękowe można zamontować na rurociągach zarówno poziomych, jak i pionowych. Przepływomierze ultradźwiękowe z głowicami nakładanymi na rurociąg montowane są bezinwazyjnie na zewnętrznej powierzchni rurociągu.

Przepływomierze ultradźwiękowe są urządzeniami bezkontaktowymi, ponieważ nie wpływają na pracę instalacji i strukturę przepływu medium. Bezkontaktowość, bezinwazyjność i łatwość montażu wpływają na to, że przepływomierze ultradźwiękowe z głowicami nakładanymi często używane są do wykonywania pomiarów kontrolnych, sprawdzających czy okresowych. Przenośność tych urządzeń jest dużą zaletą, chociażby zważywszy na konieczność okresowego wzorcowania przepływomierza.

W celu wykonania pomiaru konieczna jest wcześniejsza konfiguracja przepływomierza. Użytkownik musi dysponować szczegółowymi danymi dotyczącymi medium przepływającego w instalacji (rodzaj, temperatura, gęstość) oraz geometrii instalacji (średnica rurociągu  $D$ , grubość ścian rurociągu, materiał rurociągu). Dokładność wprowadzonych do interfejsu przepływomierza danych determinuje dokładność montażu głowic ultradźwiękowych. Wymienione powyżej parametry, których wartość należy zadeklarować na etapie konfiguracji przepływomierza, mają bezpośredni związek z impedancją akustyczną. Impedancja akustyczna jest parametrem sygnału ultradźwiękowego, mierzonego (czas przejścia fali) i przetwarzanego zgodnie z równaniem charakterystyki przepływomierza na wartość prędkości/strumienia przepływu. Parametrem mającym znaczący wpływ na prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej jest temperatura. Wpływ zmian temperatury można skompensować jednak ciągłym pomiarem temperatury medium i jej uwzględnieniem w równaniu przetwarzania przepływomierza. Możemy stwierdzić, że dokładność konfiguracji przepływomierza ultradźwiękowego w warunkach pomiaru oraz dokładne ustawienie i montaż głowic ultradźwiękowych bezpośrednio przekłada się na budżet niepewności pomiarowej. [18] [65] [94] [95] [96] [97] [42] [98] [99] [44] [45] [100]

Jak wspomniano powyżej osiągnięcie deklarowanej przez producenta przepływomierza dokładności pomiaru wymaga zachowania określonych normą prostych odcinków rurociągu za i przed przeszkodą zaburzającą przepływ (rys 3.7) Elementami mogącymi zaburzyć przepływ i tym samym znacząco wpłynąć na wynik pomiaru są takie elementy armatury jak: kolana i łuki hydrauliczne, przepustnice, zasuwy, zawory, zwężki. Niejednokrotnie dużym utrudnieniem w zastosowaniu metody ultradźwiękowej może być zachowanie wymaganych w normach odcinków prostych rurociągu, przed i za przeszkodą. Sytuacja taka zachodzi najczęściej w rurociągach o dużych średnicach.



Rys. 3.7. Wymagania producenta dotyczące zachowania prostych odcinków rurociągu [82]

Wymagane odcinki proste wynoszą najczęściej 15D - 20D, w zależności od przeszkody. Często w warunkach przemysłowych niemożliwe jest znalezienie tak długich (liczących kilkadziesiąt metrów) prostych odcinków instalacji, a technika ultradźwiękowa w takich wypadkach bywa jedyną możliwością bezinwazyjnego wykonania pomiaru. Rozwiązaniem sytuacji jest wykonanie procesu pomiarowego w warunkach niestandardowych, bez zachowania wymaganych w normach odcinków prostych rurociągu, a następnie kompensacja błędu pomiarowego za pomocą współczynnika korekcyjnego np. w postaci współczynnika kształtu rozkładu prędkości  $K^*$ . Tematyka dokonywania pomiarów z użyciem przepływomierza ultradźwiękowego w warunkach niestandardowych, tj. w odległościach od zaburzenia mniejszych niż zalecana w normach, jest bardzo często poruszana w literaturze przedmiotu: [77] [95] [97] [41] [101] [102] [103] [32] [29] [30] [37] [31] [104].

#### 4. Opis matematyczny zjawiska przepływu płynu

Jak pokazano w rozdziale 3.3.2, wyznaczenie modelu matematycznego czujnika (równania przetwarzania) jest de facto znalezieniem związku pomiędzy strumieniem objętości przepływu  $q_v$ , a mierzoną prędkością przepływu  $v$ . Parametrem określającym ten związek jest współczynnik kształtu rozkładu prędkości  $K$ . Aby dysponować więc informacjami na temat dokładności procesu pomiarowego kluczowe jest zrozumienie i szczegółowy opis matematyczny zjawiska przepływu płynu. [6] [58] [60] [105] [106] [107] W dalszej części pracy rozpatrywane będą równania rozkładów prędkości występujące w literaturze przedmiotu. [76] [77] [103] [108] [109] W celu wprowadzenia dokonano przeglądu rodzajów przepływu wyróżnianych w mechanice płynów i równań je opisujących.

Przedstawiony w tabeli 4.1 podział dotyczyć będzie warunków stosowania przepływomierzy. Istotne jest określenie i zrozumienie różnicy pomiędzy normalnymi warunkami przepływu, a normalnymi warunkami stosowania. Normalne warunki przepływu nie są zależne od typu zastosowanego przepływomierza. Normalne warunki stosowania to warunki, które muszą zachodzić ze względu na dany przepływomierz, a dokładnie, ze względu na jego urządzenie pierwotne. [17] [56] [46]



Tabela 4.1. Podział warunków wykonywania pomiarów

Normalne warunki przepływu	Normalne warunki stosowania
Rurociąg ma przekrój poprzeczny kołowy, a chropowatość wewnętrznej powierzchni ścianki jest określona.	Czujniki są zainstalowane w miejscach odpowiednich do przyjmowanego modelu matematycznego.
Rozkład prędkości wzdłuż osi rurociągu w odcinku pomiarowym jest osiowo symetryczny i nie ulega zmianom.	Płyn wypełnia cały przekrój poprzeczny urządzenia pierwotnego przepływomierza, a strumień płynu jest stały w trakcie dokonywania pojedynczego pomiaru.

Aby zbudować poprawny model matematyczny opisujący zjawisko przepływowe konieczne jest zachowanie poniższych warunków:

- funkcja  $v(r)$  powinna być funkcją ciągłą, ściśle malejącą dla  $r$  należącego do przedziału  $[0, R]$ , gdzie  $R$  jest promieniem wewnętrznym rurociągu,
- funkcja  $v(r)$  powinna być osiowo symetryczna dla przepływu w warunkach normalnych,
- dla  $r = R$  funkcja  $v(r)$  powinna przyjmować wartość 0,
- wartość pochodnej  $v(r)$  względem  $r$  powinna dążyć do zera, gdy  $r$  dąży do zera,
- pochodna  $dv(r)/dr$  dla  $r \Rightarrow R$  powinna być skończona,
- wartości prędkości odniesione do prędkości w osi rurociągu (która jest równa prędkości maksymalnej dla osiowo symetrycznego rozkładu prędkości) dla tej samej wartości  $r$  dla przepływu turbulentnego powinny być większe niż dla przepływu laminarnego (4.1) i (4.2).

$$\left(\frac{v}{v_m}\right)_t = \left(\frac{v}{v_m}\right)_l \text{ dla } r = 0 \quad (4.1)$$

$$\left(\frac{v}{v_m}\right)_t > \left(\frac{v}{v_m}\right)_l \text{ dla } r \in (0; R) \quad (4.2)$$

Liczbą kryterialną służącą do oceny i klasyfikacji przepływów jest liczba Reynoldsa, definiowana wzorem (4.3)

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (4.3)$$

Wyróżnia się wiele rodzajów przepływów, a do najczęściej spotykanych w praktyce pomiarowej należą przepływ laminarny, przejściowy i turbulentny.

#### 4.1 Przepływ przejściowy

Jak wskazuje nazwa za przepływ przejściowy uważamy przepływ, którego liczba Reynoldsa znajduje się w przedziale pomiędzy górną liczbą Reynoldsa dla przepływu laminarnego, a liczbą Reynoldsa stanowiącą dolną granicę dla przepływu turbulentnego.

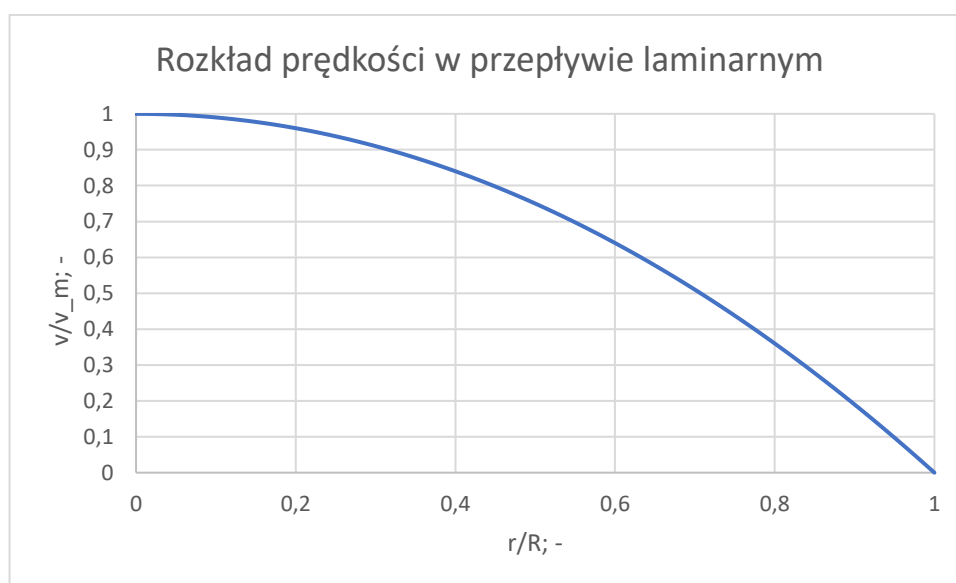
W literaturze spotykane są różne wartości dolnych i górnych liczb Reynoldsa. Znalezione w literaturze wartości dolnej liczby Reynoldsa dla przepływu przejściowego to 1000, 2000, 2300 i 2320. [57] [110] Poniżej tej liczby przepływ uważany jest za laminarny. Większą rozpiętość wykazuje górna liczba Reynoldsa dla przepływu przejściowego. Wg [110] to 4000, natomiast istnieją też źródła podające informację o wartości 10 000.

#### 4.2 Przepływ laminarny

Zjawisko przepływu laminarnego zostało szczegółowo opisane w literaturze związanej z mechaniką płynów. W ruchu laminarnym elementy płynu poruszają się po torach prostych lub łagodnie zakrzywionych, w zależności od kształtu ścian sztywnych, nadających kształt liniom prądu. Sprawia to wrażenie, jakby płyn poruszał się warstwami, między którymi nie odbywa się wymiana płynu, dlatego przepływ laminarny często nazywany jest także przepływem uwarstwionym. [57]

W przeciwieństwie do przepływu turbulentnego istnieje uniwersalny wzór opisujący rozkład prędkości (rys. 4.1) w przepływie laminarnym, nazywany wzorem Poiseuille'a. Wyprowadzenie wspomnianego wzoru można znaleźć w wielu podręcznikach. Przyjmuje on postać (4.4)

$$v = v_m \cdot \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (4.4)$$



Rys. 4.1. Wykres rozkładu prędkości w przepływie laminarnym wg wzoru (4.4)

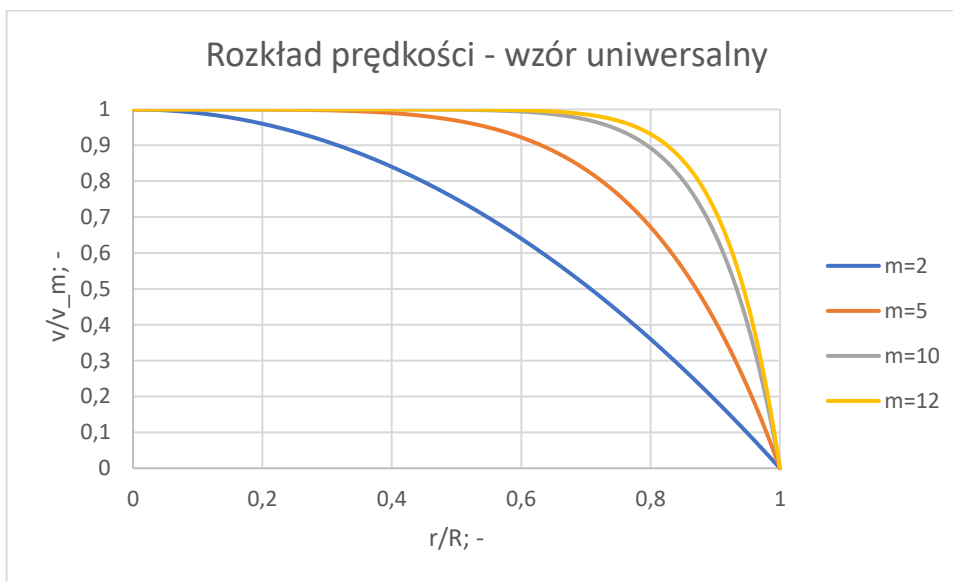
### 4.3 Przepływ turbulentny

Jak wcześniej wspomniano, w przypadku przepływu turbulentnego nie występuje uniwersalny model teoretyczny opisujący ten przepływ. Większość zamieszczonych w literaturze wzorów ma charakter doświadczalny i zostały wyznaczone na podstawie danych eksperymentalnych. Liczba wzorów opisujących przepływy turbulenty jest więc duża.

#### 4.3.1 Wzór uniwersalny

W [17] S. Waluś zamieścił uniwersalny wzór (4.5) opisujący szerokie spektrum rzeczywistych rozkładów prędkości, w zależności od wykładnika  $m$  determinującego kształt rozkładu. Współczynnik  $m=2$  odpowiada przepływowi laminarnemu, natomiast  $m \geq 10$  opisuje rozkład prędkości dla przepływu turbulentnego. Kształt rozkładów prędkości dla wybranych wartości parametru  $m$  ilustruje wykres (rys. 4.2).

$$v = v_m \cdot \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^m \right] \quad (4.5)$$



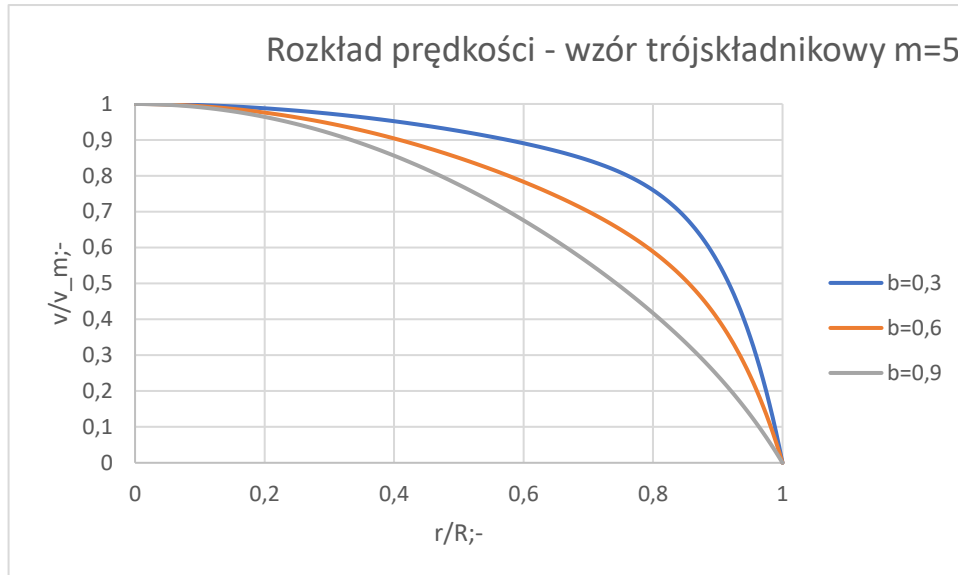
Rys. 4.2. Wykres rozkładu prędkości w przepływie turbulentnym wg wzoru uniwersalnego (4.5) wygenerowany dla różnych wartości współczynnika  $m$ .

#### 4.3.2 Wzór trójskładnikowy

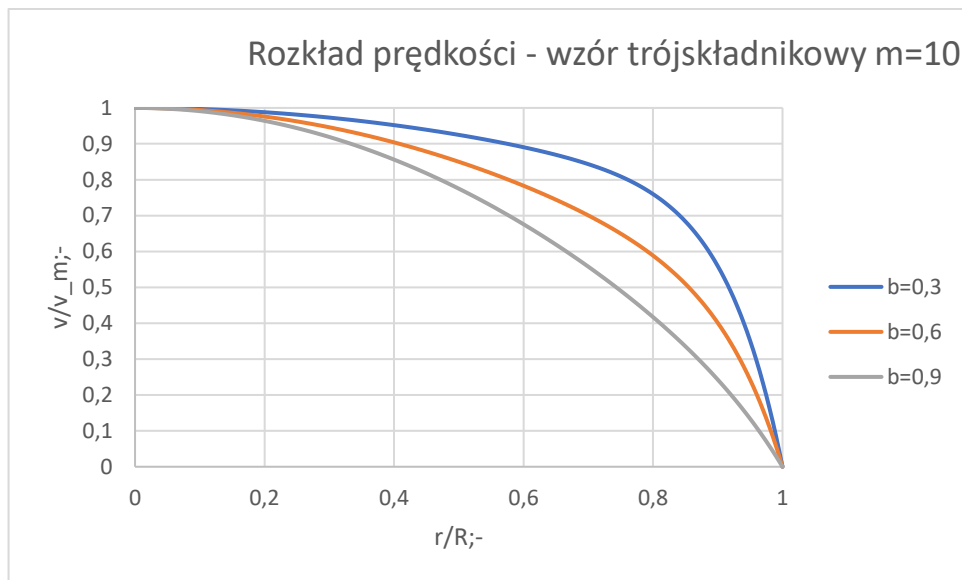
Także S. Waluś w [19] przedstawił wzór (4.6) pozwalający na lepsze dopasowanie do rzeczywistych rozkładów prędkości w przepływach turbulentnych. O kształcie profili oprócz wykładnika  $m$  decyduje współczynnik  $b$ , przyjmujący wartości w zakresie  $\langle 0;1 \rangle$ . Należy zauważyć, że dla skrajnych wartości  $b=0$  otrzymuje się wzór uniwersalny przedstawiony w rozdziale 4.3.1, a dla  $b=1$  otrzymuje się wzór opisujący rozkład prędkości w przepływie laminarnym przedstawiony w rozdziale 4.2.

$$v = v_m \cdot \left[ 1 - b \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^2 - (1 - b) \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^m \right] \quad (4.6)$$

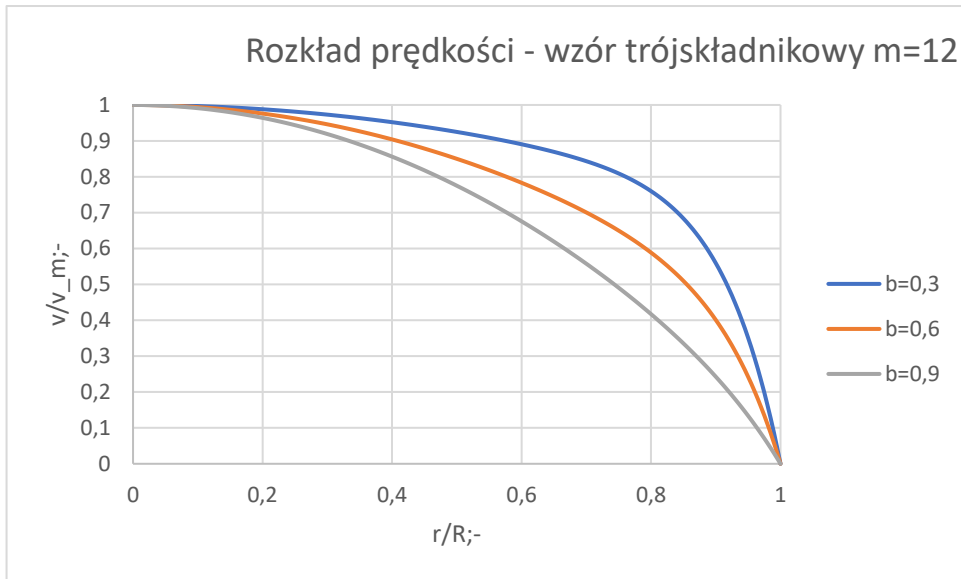
Poniżej na wykresach (rys. 4.3 - 4.5) przedstawiono rozkłady prędkości dla wybranych wartości współczynników  $b$  (0,3; 0,6; 0,9) oraz  $m$  (5; 10; 12).



Rys. 4.3. Wykres rozkładu prędkości w przepływie turbulentnym wg wzoru trójskładnikowego (4.6) wygenerowany dla różnych wartości współczynnika  $b$  i wartości współczynnika  $m=5$ .



Rys. 4.4. Wykres rozkładu prędkości w przepływie turbulentnym wg wzoru trójskładnikowego (4.6) wygenerowany dla różnych wartości współczynnika  $b$  i wartości współczynnika  $m=10$ .



Rys. 4.5. Wykres rozkładu prędkości w przepływie turbulentnym wg wzoru trójskładnikowego (4.6) wygenerowany dla różnych wartości współczynnika b i wartości współczynnika m=12.

#### 4.3.3 Wzór Prandtla

Najpowszechniej używanym i cytowanym w literaturze jest wzór potęgowy Prandtla (4.7), w którym  $1/n$  jest wykładnikiem zależnym od liczby Reynoldsa oraz chropowatości kanału przepływowego.

$$v = v_m \cdot \left( 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} \right) \quad (4.7)$$

Podobnie jak istnieje wiele wariantów wzorów opisujących rozkład prędkości w przepływie turbulentnym, istnieje wiele formuł pozwalających wyznaczyć wartość współczynnika n. Poniżej zostaną zaprezentowane najpopularniejsze z nich:

W [111] autor podaje zależność  $n(Re)$  przy czym dla  $Re \in (10^4, 2 \cdot 10^4)$   $n = 7$ , a dla  $Re \in (5 \cdot 10^5, 10^7)$  do  $10^7$  i rur hydraulicznie gładkich (4.8)

$$n = 2,1 \cdot \log Re - 1,9 \quad (4.8)$$

W [112] znajdujemy zależność (4.9)

$$n = 1,66 \cdot \log Re \quad (4.9)$$

W [110] podane zostały dwie zależności funkcjonujące dla liczb Reynoldsa  $Re$  mniejszych od 400 000 (4.10) oraz  $Re$  większych od 400 000 (4.11).

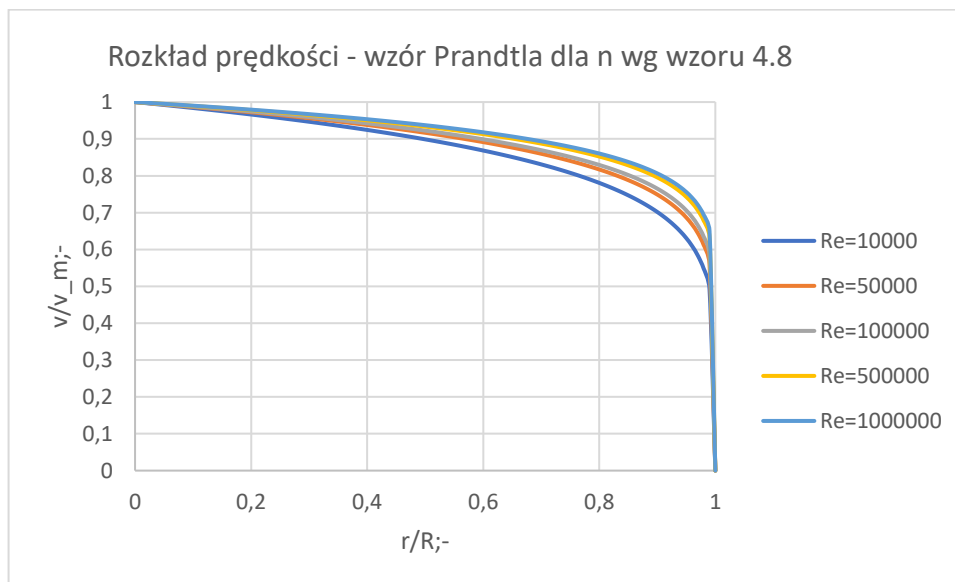
$$n = 3,299 + 0,326 \cdot \ln Re \text{ dla } Re < 400000 \quad (4.10)$$

$$n = 5,547 + 5,498 \cdot 10^{-6} \cdot (\ln Re)^5 \text{ dla } Re > 400000 \quad (4.11)$$

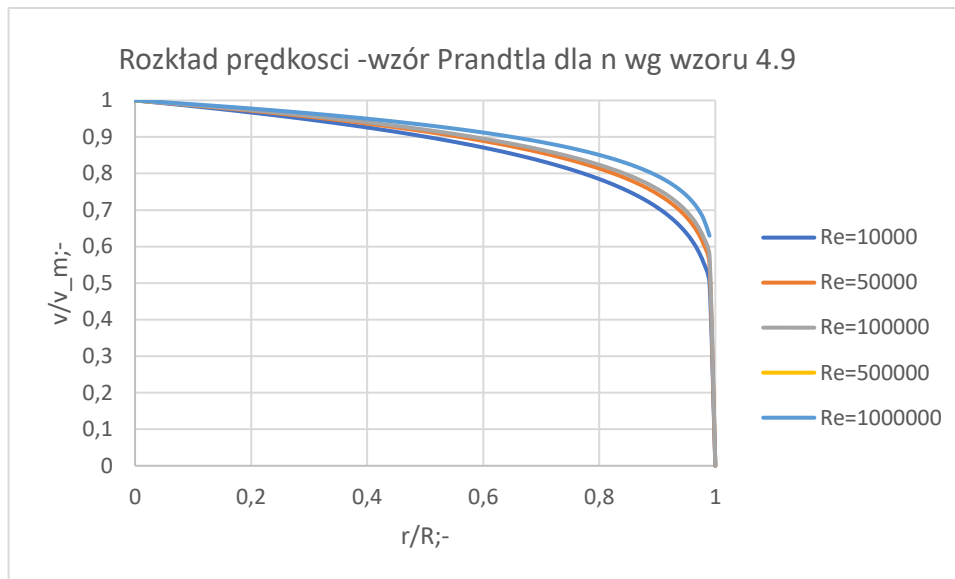
W tabeli 4.2 zebrano obliczone wartości  $n$  wg wzorów (4.8) – (4.11) dla wybranych liczb Reynoldsa z zakresu (10 000 , 1 000 000). Dla wybranych  $Re$  zauważalne są różnice w wartościach współczynnika  $n$  otrzymanego przy użyciu wzorów (4.8) – (4.11) sięgające kilku procent. Profile rozkładu prędkości otrzymane przez skorzystanie ze wzoru Prandtla dla wyznaczonych wartości  $n$  i przedstawiono graficznie na wykresach (rys. 4.6 – rys. 4.8).

Tabela 4.2. Zależność wartości współczynnika  $n$  występującego we wzorze Prandtla od liczby Reynoldsa  $Re$ .

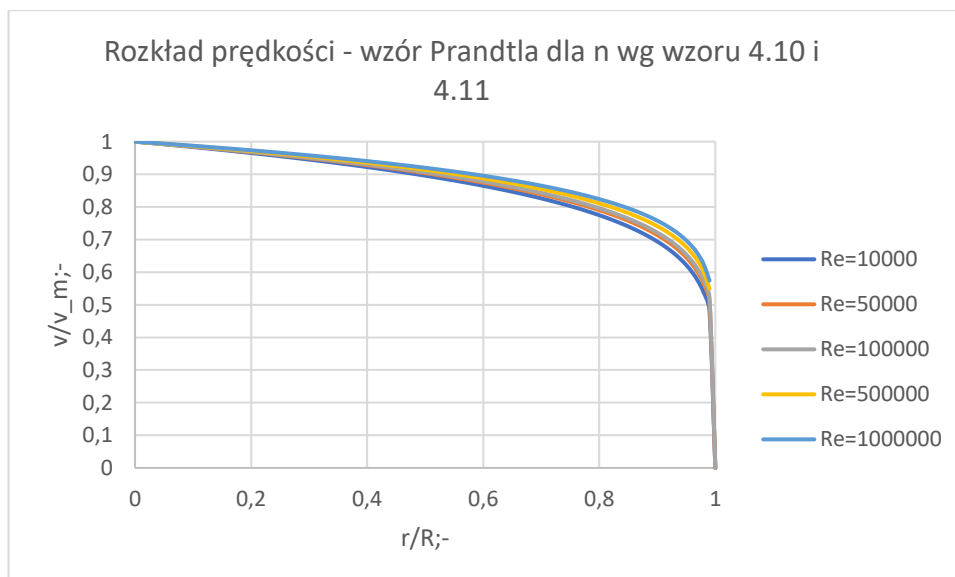
Zależność $n(Re)$				
Re	Wzór 4.8	Wzór 4.9	Wzór 4.10	Wzór 4.11
10 000	6,500	6,640	6,302	-
50 000	7,968	7,800	6,826	-
100 000	8,600	8,300	7,052	-
500 000	10,068	9,460	-	7,676
1 000 000	10,700	9,960	-	8,304



Rys. 4.6. Wykres rozkładu prędkości w przepływie turbulentnym wg wzoru Prandtla (4.7) wygenerowane dla liczb Reynoldsa z zakresu 10 000 – 1 000 000 i współczynnika  $n$  obliczonego wg wzoru (4.8)



Rys. 4.7. Wykres rozkładu prędkości w przepływie turbulentnym wg wzoru Prandtla (4.7) wygenerowane dla liczb Reynoldsa z zakresu 10 000 – 1 000 000 i współczynnika n obliczonego wg wzoru (4.9)



Rys. 4.8. Wykres rozkładu prędkości w przepływie turbulentnym wg wzoru Prandtla (4.7) wygenerowane dla liczb Reynoldsa z zakresu 10 000 – 1 000 000 i współczynnika n obliczonego wg wzorów (4.10) i (4.11).

#### **4.4 Przegląd modeli matematycznych przepływu turbulentnego o zaburzonym rozkładzie prędkości. Wyznaczenie wartości współczynnika $K$ dla modeli**

Niniejsza rozprawa doktorska rozpatruje zagadnienie wykonywania pomiarów przepływu za elementami zaburzającymi przepływ, będącymi najczęściej elementami armatury rurociągu (kolana hydrauliczne, dyfuzory, zawory, zwężki pomiarowe) lub elementami zewnętrznymi takimi jak czujniki i sondy pomiarowe. Zmiany powstałe w wyniku zaburzenia przepływu najczęściej objawiają się w utracie osiowosymetryczności przepływu. Powstają obszary zwiększonej i zmniejszonej prędkości, których uwzględnienie w równaniu rozkładu prędkości często jest problematyczne i wymaga wprowadzenia dodatkowej zmiennej kątowej  $\vartheta$ .

Istnieje wiele modeli matematycznych opisujących zniekształcone rozkłady prędkości, a do najczęściej używanych należą modele zawarte w [17] [76] [108]. Model zniekształconego rozkładu prędkości (4.12) można przedstawić jako sumę dwóch składowych: składowej niezniekształconej oraz składowej zniekształconej, gdzie  $v_1(r)$  – składowa niezniekształcona,  $v_2(r, \vartheta)$  – składowa zniekształcająca,  $\vartheta$  – współrzędna kątowa. [17] [46]

$$v(r) = v_1(r) + v_2(r, \vartheta) \quad (4.12)$$

W dalszej części pracy dokonano szczegółowej analizy równań zniekształconych rozkładów prędkości (modele 1 - 14), opartych na przedstawionym powyżej schemacie. Rozpatrywane równania opisują przepływy w kanale o przekroju kołowym, zniekształcone przez różnego typu zaburzenia.

Współczynniki występujące w równaniach mają następujące znaczenie:

$n$  – współczynnik związany z rodzajem przepływu ( $Re$ ) i chropowatością rurociągu:  $n=2$  dla przepływu laminarnego, oraz  $n$  rzędu kilkanaście dla przepływu turbulentnego,

$k$  – współczynnik charakteryzujący zniekształcenie rozkładu prędkości zależny od rodzaju przepływu ( $Re$ ),

$m, a$  – dodatkowe współczynniki zniekształcenia rozkładu prędkości,

$\vartheta$  – współrzędna kątowa.

Celem przeprowadzonej analizy jest identyfikacja równania opisującego zniekształcenie profilu prędkości zbieżne z zaburzeniem wywołanym przez przeszkodę w postaci zasuwę nożowej. Przez podstawienie w miejsce  $v_0$  prędkości średniej zmierzonej w danym przekroju pomiarowym za zasuwę nożową możemy otrzymać zniekształcony rozkład prędkości w tym przekroju. Dopasowanie teoretycznego profilu prędkości do profilu rzeczywistego można osiągnąć przez znalezienie optymalnych wartości współczynników  $n, m, k, a$  decydujących o kształci profilu prędkości. Teoretyczne profile prędkości będą służyły porównaniom z rzeczywistymi profilami prędkości uzyskanymi przez pomiar przepływomierzem ultradźwiękowym przy różnych ustawieniach głowic przepływomierza. Założono więc, że współrzędna kątowa  $\vartheta$  jest tożsama z kątem  $\alpha$  określającym położenie drogi fali ultradźwiękowej. Takie założenie jest dużym uproszczeniem, ponieważ kąt  $\vartheta$  jest kątem mierzonym w płaszczyźnie przekroju rurociągu (w danej odległości od zasuwę), natomiast kąt przejścia fali ultradźwiękowej  $\alpha$  ma wymiar przestrzenny ( jest kątem określanym na danym odcinku pomiędzy czujnikami przepływomierza).



Współczynnikiem pozwalającym określić stopień zniekształcenia profilu prędkości jest współczynnik kształtu rozkładu prędkości  $K^*$  (4.13). Współczynnik ten wyraża się stosunkiem prędkości średniej przepływu cieczy w przekroju rurociągu  $v_S$  do prędkości średniej płynu pod drodze przejścia fali ultradźwiękowej  $v_c$  do:

$$K^* = \frac{v_S}{v_c} \quad (4.13)$$

Prędkość średnią w przekroju rurociągu obliczono z zależności (4.14).

$$v_S = \frac{1}{S} \int v dS \quad (4.14)$$

Prędkość średnią po drodze przejścia fali ultradźwiękowej (w przekroju poprzecznym rurociągu) dla przepływów osiowosymetrycznych wyraża się zależnością (4.15).

$$v_c = \frac{1}{R} \cdot \int_0^R v(r) dr \quad (4.15)$$

Współczynnik K wyznaczony dla równania Prandtla (4.7) wyraża się wzorem (4.16).

$$K_{Pr}^* = \frac{v_S}{v_c} = \frac{2n}{2n+1} \quad (4.16)$$

Jak wspomniano powyżej przyjmujemy, że cięciwa wyznaczana przez współrzędną kątową  $\vartheta$  pokrywa się z drogą przejścia fali ultradźwiękowej pod kątem  $\alpha$ , dlatego możemy porównywać wartość współczynnika K z wartością współczynnika  $K^*$  dla pomiarów wykonanych przy użyciu przepływomierza ultradźwiękowego. Wartość współczynnika K wyznaczono dla modeli 1-14 przez poddanie operacji całkowania równań rozkładów prędkości  $v(r, \vartheta)$  danego modelu. Przedstawione modele zostały podzielone na 3 zasadnicze grupy, a zastosowanym kryterium podziału była liczba ekstermów prędkości. Wyróżniono, tak jak w [76] [108], modele z 1 szczytem prędkości, z 2 szczytami oraz z 3 lub więcej szczytami prędkości. Podział ten wyraźnie zaznaczono w tabeli 4.3.

Model nr 1

$$v_1(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot \vartheta \cdot \sin\vartheta \right] \quad (4.17)$$

gdzie  $n=9, k=4, m = -\frac{0,5}{\pi}$

Model nr 2

$$v_2(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot \vartheta \cdot \sin\vartheta \right] \quad (4.18)$$

gdzie  $n=7, k=4, m = -\frac{0,4}{\pi}$

Model nr 3

$$v_3(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot (\vartheta^2 - 1) \cdot (1 - \cos\vartheta)^2 \right] \quad (4.19)$$

gdzie  $n=9, k=4, m = \frac{0,04}{\pi}$

Model nr 4

$$v_4(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-a\vartheta} \cdot \sin\vartheta \right] \quad (4.20)$$

gdzie  $n=9, k=0,5, m = 3,317, a=0,5$

Model nr 5

$$v_5(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-a\vartheta} \cdot \sin\vartheta \right] \quad (4.21)$$

gdzie  $n=7, k=9, m = \frac{e^{0,1\pi}}{2}, a=0,2$

Model nr 6

$$v_6(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-a\vartheta} \cdot \sin\vartheta \right] \quad (4.22)$$

gdzie  $n=7, k=9, m = -\frac{e^{0,1\pi}}{2}, a=0,2$

Model nr 7

$$v_7(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot \vartheta^2 \cdot (2\pi - \vartheta)^2 \right] \quad (4.23)$$

gdzie  $n=9, k=4, m = \frac{2}{\pi^5}$

Model nr 8

$$v_8(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot \vartheta \cdot \cos^2\vartheta \right] \quad (4.24)$$

gdzie  $n=9, k=4, m = \frac{1}{\pi^2}$

Model nr 9

$$v_9(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot \vartheta \cdot (2\pi - \vartheta) \cdot \sin^2\vartheta \right] \quad (4.25)$$

gdzie  $n=9, k=4, m = \frac{2}{\pi^3}$

Model nr 10

$$v_{10}(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-a\vartheta} \cdot \sin^2\vartheta \right] \quad (4.26)$$

gdzie  $n=9, k=9, m = 0,6813, a=0,1$

Model nr 11

$$v_{11}(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-a\vartheta} \cdot \sin^2\vartheta \right] \quad (4.27)$$

gdzie  $n=7, k=9, m = e^{0,1\pi}, a=0,2$

Model nr 12

$$v_{12}(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-a\vartheta} \cdot \sin\vartheta \right] \quad (4.28)$$

gdzie  $n=9, k=0,5, m = -6,7501, a=0,5$

Model nr 13

$$v_{13}(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot (2\pi - \vartheta)^2 \cdot \vartheta \cdot \sin 3\vartheta \right] \quad (4.29)$$

gdzie  $n=7, k=9, m = \frac{1}{2\pi^2}$

Model nr 14

$$v_{14}(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-a\vartheta} \cdot \sin^2 5\vartheta \right] \quad (4.30)$$

gdzie  $n=4, k=9, m = \frac{e^{0,15\pi}}{2}, a=0,3$

Poniżej zaprezentowano przykładowe obliczenia prędkości  $v_{S4}$  i  $v_{c4}$ , których wyznaczenie pozwala na otrzymanie wzoru opisującego współczynnik K dla modelu nr 4 rozkładu prędkości (4.31).

$$v_4(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-a\vartheta} \cdot \sin\vartheta \right] \quad (4.31)$$

Dokonując operacji całkowania równania opisującego rozkład prędkości otrzymujemy zależności funkcyjne opisujące prędkość średnią płynu w przekroju rurociągu  $v_S$  (4.32) i prędkość średnią płynu w przekroju poprzecznym rurociągu  $v_c$  (4.33).

$$\begin{aligned}
v_{S4} &= \frac{1}{\pi R^2} \cdot \int v dS \\
&= v_o \cdot \frac{1}{\pi R^2} \left\{ \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^R \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-a\vartheta} \cdot \sin\vartheta \right\} r dr = \\
&= v_o \cdot \frac{1}{\pi R^2} \cdot \left\{ \frac{2\pi \cdot n^2 \cdot R^2}{(n+1) \cdot (2n+1)} + \frac{2k^3 \cdot m \cdot R^2}{(k+1) \cdot (2k+1) \cdot (3k+1)} \cdot \frac{1 - e^{-2\pi a}}{a^2 + 1} \right\} = \\
&= v_o \cdot \left\{ \frac{2n^2}{(n+1) \cdot (2n+1)} + \frac{2k^3 \cdot m}{\pi \cdot (k+1) \cdot (2k+1) \cdot (3k+1)} \cdot \frac{1 - e^{-2\pi a}}{a^2 + 1} \right\}
\end{aligned} \tag{4.32}$$

$$\begin{aligned}
v_{c4} &= \frac{v_o}{R} \cdot \left\{ \left( \frac{1}{2} \cdot \int_0^R \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-a\vartheta} \cdot \sin\vartheta dr \right) \right. \\
&\quad \left. + \left( \frac{1}{2} \cdot \int_0^R \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-a(\vartheta+\pi)} \cdot \sin(\vartheta + \pi) dr \right) \right\} \\
&= v_o \cdot \left\{ \frac{n}{n+1} + \frac{k^2 \cdot m \cdot \sin\vartheta}{2 \cdot (k+1) \cdot (2k+1)} \cdot (e^{-a\vartheta} - e^{-a(\vartheta+\pi)}) \right\}
\end{aligned} \tag{4.33}$$

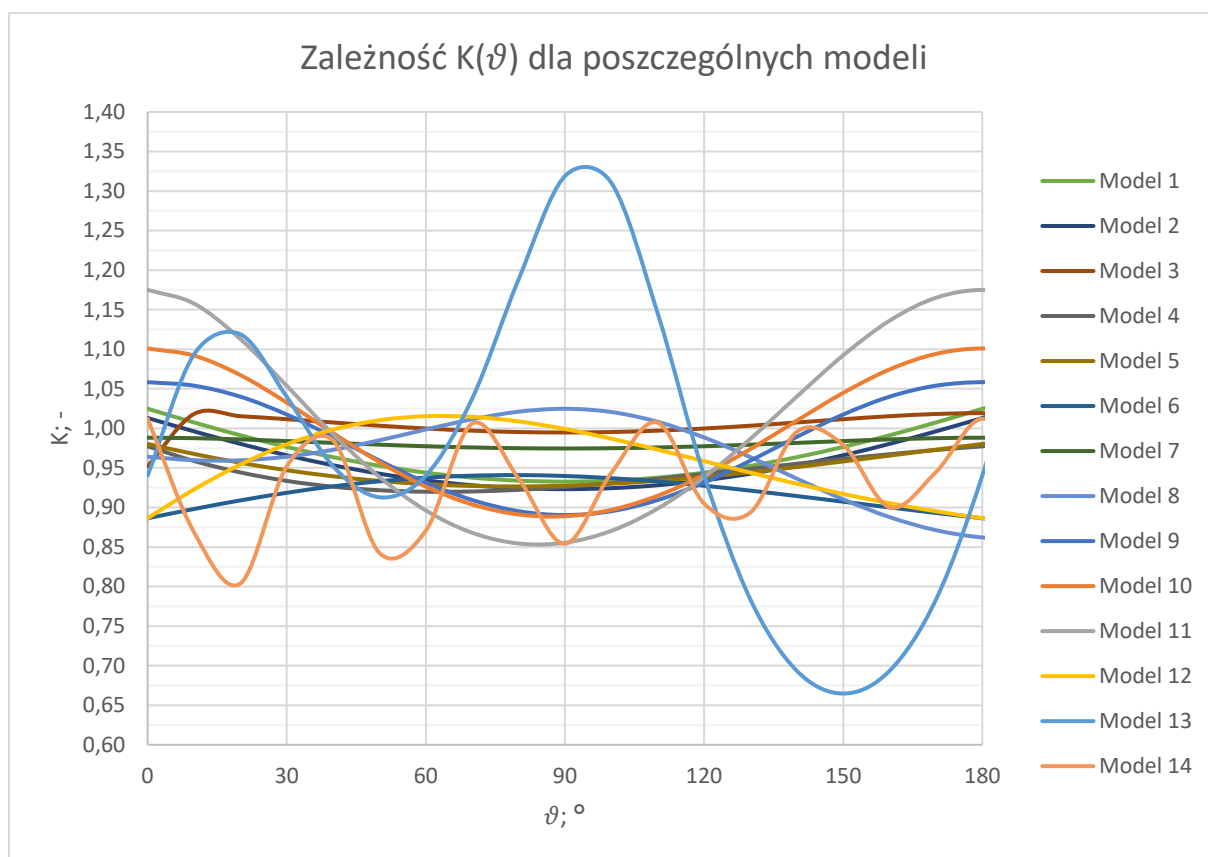
Finalnie wyrażenie opisujące wartość współczynnika  $K^*$  przyjmuje postać (4.34)

$$\begin{aligned}
K^*_4 &= \frac{v_{S4}}{v_{c4}} = \\
&= \frac{v_o \cdot \left\{ \frac{2n^2}{(n+1) \cdot (2n+1)} + \frac{2k^3 \cdot m}{\pi \cdot (k+1) \cdot (2k+1) \cdot (3k+1)} \cdot \frac{1 - e^{-2\pi a}}{a^2 + 1} \right\}}{v_o \cdot \left\{ \frac{n}{n+1} + \frac{k^2 \cdot m \cdot \sin\vartheta}{2 \cdot (k+1) \cdot (2k+1)} \cdot (e^{-a\vartheta} - e^{-a(\vartheta+\pi)}) \right\}} = \\
&= \frac{\frac{2n^2}{(n+1) \cdot (2n+1)} + \frac{2k^3 \cdot m}{\pi \cdot (k+1) \cdot (2k+1) \cdot (3k+1)} \cdot \frac{1 - e^{-2\pi a}}{a^2 + 1}}{\frac{n}{n+1} + \frac{k^2 \cdot m \cdot \sin\vartheta}{2 \cdot (k+1) \cdot (2k+1)} \cdot (e^{-a\vartheta} - e^{-a(\vartheta+\pi)})}
\end{aligned} \tag{4.34}$$

Wartości współczynnika  $K^*$  wyznaczone w zakresie  $0^\circ$ - $180^\circ$  dla poszczególnych modeli zniekształconych rozkładów prędkości przedstawia tabela 4.3. Graficzną ilustrację zależności  $K^*(\vartheta)$  stanowi wykres rys. 4.9.

Tabela 4.3. Zestawienie wartości współczynnika  $K^*$  dla różnych modeli zniekształconego rozkładu prędkości.

Model	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\vartheta; ^\circ$	K													
0	1,025	1,013	0,952	0,977	0,980	0,886	0,988	0,964	1,058	1,101	1,175	0,886	0,940	1,012
10	1,007	0,996	1,018	0,959	0,968	0,898	0,988	0,960	1,054	1,092	1,158	0,923	1,093	0,869
20	0,991	0,980	1,015	0,944	0,957	0,909	0,986	0,960	1,040	1,067	1,113	0,954	1,119	0,804
30	0,977	0,966	1,012	0,934	0,947	0,919	0,984	0,964	1,018	1,033	1,054	0,980	1,040	0,952
40	0,964	0,953	1,007	0,926	0,939	0,927	0,982	0,973	0,989	0,994	0,993	0,999	0,952	0,985
50	0,953	0,943	1,003	0,922	0,934	0,933	0,979	0,985	0,959	0,957	0,938	1,010	0,913	0,842
60	0,944	0,934	1,000	0,920	0,929	0,938	0,977	0,999	0,931	0,926	0,896	1,015	0,940	0,871
70	0,938	0,928	0,997	0,920	0,927	0,940	0,976	1,012	0,909	0,904	0,868	1,015	1,038	1,006
80	0,934	0,924	0,995	0,922	0,927	0,941	0,975	1,021	0,895	0,891	0,854	1,009	1,188	0,937
90	0,933	0,923	0,995	0,926	0,928	0,940	0,975	1,025	0,890	0,889	0,855	0,999	1,319	0,854
100	0,934	0,924	0,995	0,931	0,930	0,937	0,975	1,021	0,895	0,897	0,870	0,987	1,310	0,944
110	0,938	0,928	0,997	0,936	0,934	0,933	0,976	1,008	0,909	0,915	0,899	0,973	1,145	1,007
120	0,944	0,934	1,000	0,942	0,939	0,927	0,977	0,988	0,931	0,941	0,938	0,959	0,940	0,905
130	0,953	0,943	1,003	0,949	0,945	0,921	0,979	0,964	0,959	0,974	0,987	0,944	0,784	0,894
140	0,964	0,953	1,007	0,955	0,951	0,914	0,982	0,936	0,989	1,010	1,040	0,930	0,694	0,996
150	0,977	0,966	1,012	0,962	0,958	0,907	0,984	0,910	1,018	1,045	1,092	0,917	0,665	0,979
160	0,991	0,980	1,015	0,967	0,966	0,900	0,986	0,888	1,040	1,074	1,136	0,905	0,694	0,900
170	1,007	0,996	1,018	0,973	0,973	0,893	0,988	0,871	1,054	1,094	1,165	0,895	0,784	0,945
180	1,025	1,013	1,019	0,977	0,980	0,886	0,988	0,862	1,058	1,101	1,175	0,886	0,940	1,012
Rodzaj	1 szczyt							2 szczyty				więcej		



Rys. 4.9. Wykres rozkładu prędkości wygenerowany na podstawie równań zniekształconego rozkładu prędkości dla modeli 1-14.

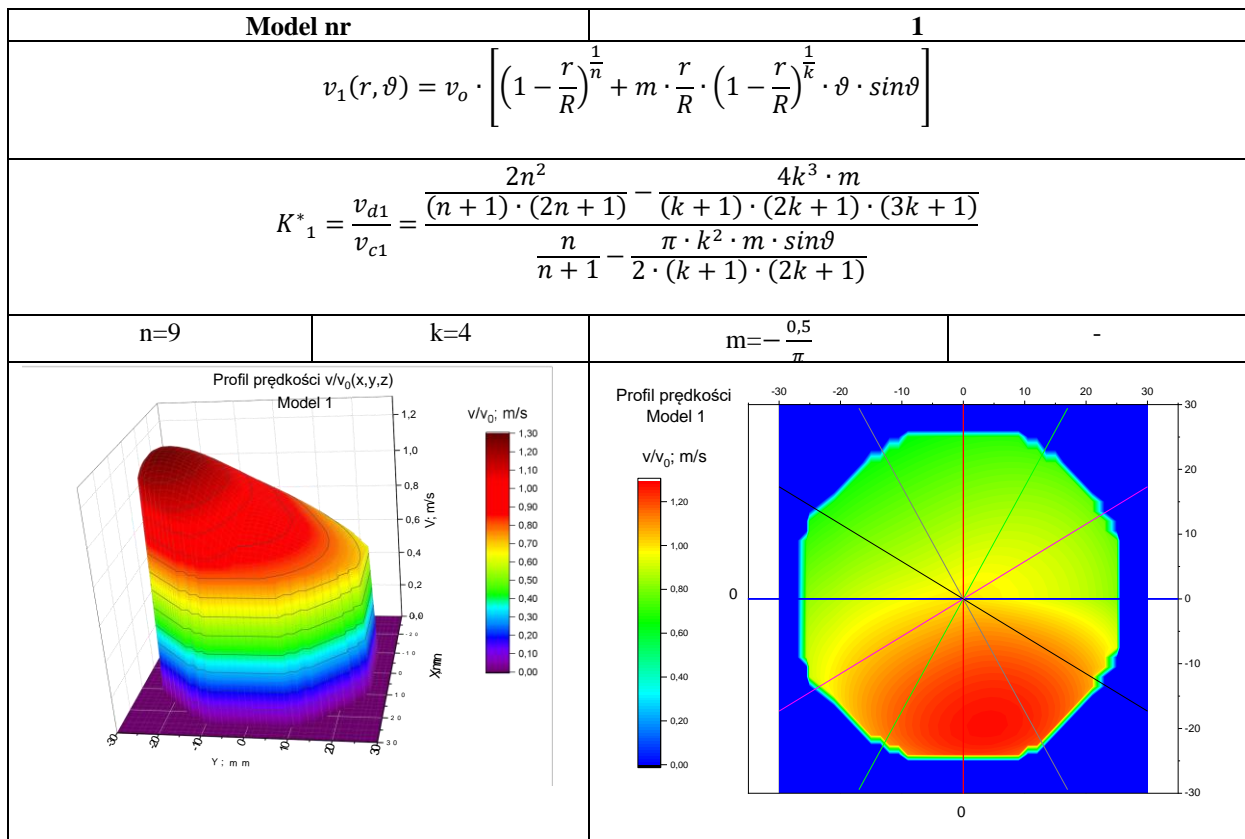
Zarówno w tabeli 4.3 jak i na wykresie rys. 4.9 widoczna jest okresowość poszczególnych funkcji. Analizując dane przedstawione w tabeli można zauważyć, że istnieją podobieństwa pomiędzy poszczególnymi równaniami, jeśli chodzi o występowanie stref zwiększonej/zmniejszonej prędkości. Analogiczny przebieg mają przykładowo modele 1, 2, 4, 5, 12 czy też modele 10 i 11. Zniekształcenie profilu opisane jest w ich przypadku takimi samymi zależnościami funkcyjnymi, a za stopień i rozkład zaburzenia odpowiadają współczynniki  $k$ ,  $m$ , a oraz współrzędna kątowa  $\vartheta$ . Jak wcześniej zaznaczono, analizując zmienność funkcji spośród wszystkich modeli możemy wyróżnić 3 podstawowe grupy równań: równania z jednym szczytem, z dwoma szczytami i z trzema lub więcej szczytami. Podział ten jest łatwo dostrzegalny wizualnie na zamieszczonych poniżej profilach prędkości wykonanych w formie 2D i 3D przy użyciu programów MS Excel oraz Origin. rys 4.9 przedstawia siatkę punktów stworzoną w programie MS Excel w celu graficznej prezentacji modeli rozkładów prędkości w tabelach 4.4 - 4.17. Stosując kryteria podobieństwa i dobierając optymalne wartości współczynników równania można dopasować model teoretyczny rozkładu prędkości do znanego rozkładu prędkości przepływu rzeczywistego.



Rys. 4.9. Siatka punktów, wygenerowana w programie MS Excel, do przestrzennej prezentacji modeli rozkładów prędkości.

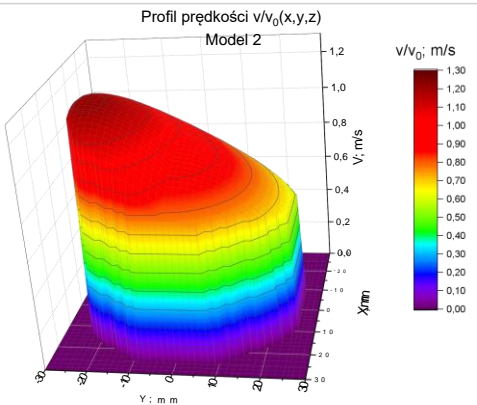
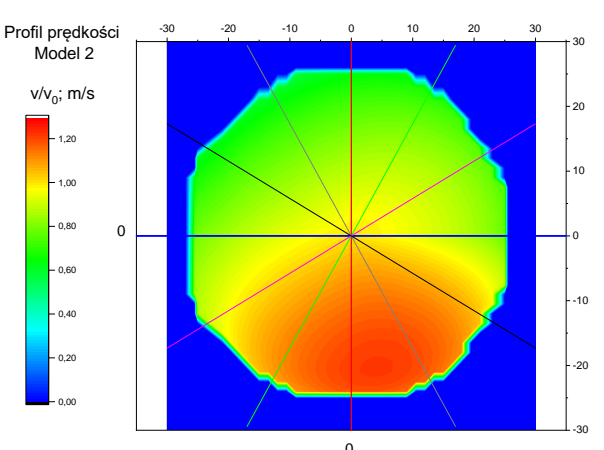
Na zamieszczonych poniżej profilach rozkładu prędkości przyjęto orientację centralną w przypadku prezentacji pałkiskich profili 2D – pionowa czerwona linia oznacza kąt 0°, pozostałe linie wyznaczają kolejno co 30° kąty, zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara. Przestrzenne profile prędkości 3D zostały zamieszczone w obrocie o 90°, w celu zapewnienia lepszej wizualizacji danych.

Tabela 4.4. Graficzna prezentacja modelu nr 1 zniekształconego rozkładu prędkości przepływu.



Profile prędkości modelu 1 wyraźnie wskazują na niesymetryczny rozkład prędkości względem dwóch współrzędnych (OX i OY). Asymetria względem osi OY jest mniejsza. Profil prędkości 2D wyraźnie wskazuje przesunięcie maksimum prędkości w kierunku ujemnych wartości Y (-25, -15 mm) i wartości X (-5, 15 mm). Przesunięcie to zależy od znaku i wartości parametru m, przyjmującego wartość ujemną  $m = -\frac{0,5}{\pi}$  oraz funkcji trygonometrycznej, sinus kąta  $\vartheta$ .

Tabela 4.5 Graficzna prezentacja modelu nr 2 zniekształconego rozkładu prędkości przepływu.

Model nr		2	
$v_2(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot \vartheta \cdot \sin\vartheta \right]$			
$K^*_2 = \frac{v_{d2}}{v_{c2}} = \frac{\frac{2n^2}{(n+1) \cdot (2n+1)} - \frac{4k^3 \cdot m}{(k+1) \cdot (2k+1) \cdot (3k+1)}}{\frac{n}{n+1} - \frac{\pi \cdot k^2 \cdot m \cdot \sin\vartheta}{2 \cdot (k+1) \cdot (2k+1)}}$			
n=7	k=9	$m = -\frac{0,4}{\pi}$	-
			

Profile prędkości modelu 2 wykazują analogiczne właściwości, jak w przypadku modelu 1. Człon opisujący zniekształcenie rozkładu prędkości jest w przypadku modeli 1 i 2 jednakowy. Modele te różnią się między sobą wartościami parametrów n, k, m, co wpływa na różnice w wartościach prędkości i wyznaczonego współczynnika kształtu rozkładu prędkości K.



Tabela 4.6. Graficzna prezentacja modelu nr 3 zniekształconego rozkładu prędkości przepływu.

<b>Model nr</b>		<b>3</b>	
$v_3(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot (\vartheta^2 - 1) \cdot (1 - \cos\vartheta)^2 \right]$			
$K^*_3 = \frac{v_{d3}}{v_{c3}} = \frac{\frac{2n^2}{(n+1) \cdot (2n+1)} + \frac{2k^3 \cdot m}{(k+1) \cdot (2k+1) \cdot (3k+1)} \cdot \frac{16\pi^4}{15}}{\frac{n}{n+1} + \frac{k^2 \cdot m}{2 \cdot (k+1) \cdot (2k+1)} \cdot (\pi^4 + 2\pi^2 \cdot \vartheta^2 - 4\pi\vartheta^3 + 2\pi\vartheta^4)}$			
n=9	k=4	m= $\frac{0,04}{\pi}$	-

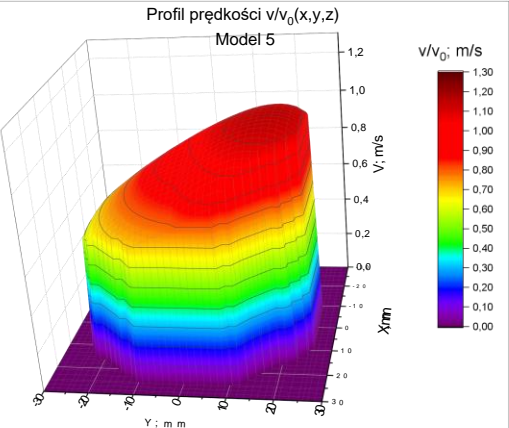
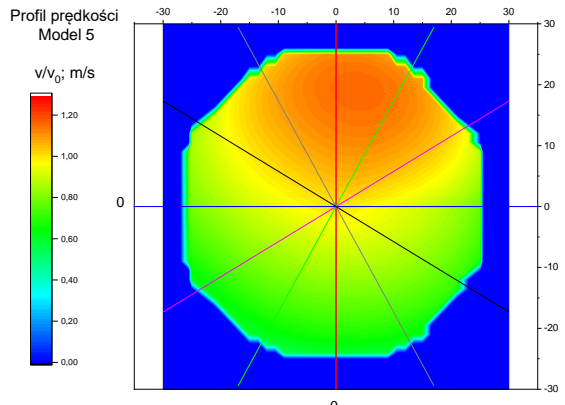
Profile prędkości modelu 3 pokazują niesymetryczny rozkład prędkości względem obu osi współrzędnych (OX i OY). Profil prędkości 2D wskazuje na przesunięcie maksimum prędkości w kierunku ujemnych wartości X (-20 , -10 mm) i ujemnych wartości Y (-20 , -10 mm). Kierunek przesunięcia zależny jest od znaku i wartości parametru m, przyjmującego w tym przypadku wartość dodatnią  $m = \frac{0,04}{\pi}$  oraz od funkcji trygonometrycznej kąta  $\vartheta$ . W odróżnieniu od poprzednio prezentowanych modeli 1 i 2 zniekształcenie profilu prędkości opisywane jest członem  $(\vartheta^2 - 1) \cdot (1 - \cos\vartheta)^2$ .

Tabela 4.7. Graficzna prezentacja modelu nr 4 zniekształconego rozkładu prędkości przepływu.

<b>Model nr</b>		<b>4</b>	
$v_4(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-a\vartheta} \cdot \sin\vartheta \right]$			
$K^*_4 = \frac{v_{d4}}{v_{c4}} = \frac{2n^2}{(n+1) \cdot (2n+1)} + \frac{2k^3 \cdot m}{\pi \cdot (k+1) \cdot (2k+1) \cdot (3k+1)} \cdot \frac{1 - e^{-2\pi a}}{a^2 + 1}$ $\frac{n}{n+1} + \frac{k^2 \cdot m \cdot \sin\vartheta}{2 \cdot (k+1) \cdot (2k+1)} \cdot (e^{-a\vartheta} - e^{-a(\vartheta+\pi)})$			
n=9	k=0,5	m=3,3170	a=0,5

Profile prędkości modelu 4 wskazują niesymetryczny rozkład prędkości względem obu osi współrzędnych (OX i OY). Profil prędkości 2D wskazuje na przesunięcie maksimum prędkości w kierunku dodatnich wartości Y (5 , 15 mm) i X (0 , 10 mm). Zniekształcenie profilu prędkości opisywane jest członem  $e^{-a\vartheta} \cdot \sin\vartheta$ . Kierunek przesunięcia zależy od znaku i wartości parametru m, przyjmującego w tym przypadku wartość dodatnią m=3,3170, od funkcji trygonometrycznej sinus kąta oraz od ujemnego iloczynu współczynnika a=0,5 i kąta  $\vartheta$  będącego wykładnikiem potęgi o podstawie logarytmu naturalnego e.

Tabela 4.8. Graficzna prezentacja modelu nr 5 zniekształconego rozkładu prędkości przepływu.

<b>Model nr</b>		<b>5</b>	
$v_5(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-a\vartheta} \cdot \sin\vartheta \right]$			
$K_5^* = \frac{v_{d5}}{v_{c5}} = \frac{2n^2}{(n+1) \cdot (2n+1)} + \frac{2k^3 \cdot m}{\pi \cdot (k+1) \cdot (2k+1) \cdot (3k+1)} \cdot \frac{1 - e^{-2\pi a}}{a^2 + 1}$ $\frac{n}{n+1} + \frac{k^2 \cdot m \cdot \sin\vartheta}{2 \cdot (k+1) \cdot (2k+1)} \cdot (e^{-a\vartheta} - e^{-a(\vartheta+\pi)})$			
n=7	k=9	$m = \frac{e^{0,1\pi}}{2}$	a=0,2
			

Profile prędkości modelu 5 wskazują niesymetryczny rozkład prędkości względem obu osi współrzędnych (OX i OY), przy czym asymetria względem osi OY jest znacząco mniejsza. Profil prędkości 2D wskazuje na przesunięcie maksimum prędkości w kierunku dodatnich wartości Y (20 , 25 mm) i X (0 , 10 mm). Zniekształcenie profilu prędkości, podobnie jak dla modelu 4, opisywane jest członem  $e^{-a\vartheta} \cdot \sin\vartheta$ . Kierunek przesunięcia zależy od znaku i wartości parametru m, przyjmującego w tym przypadku wartość dodatnią  $m = \frac{e^{0,1\pi}}{2}$ , od funkcji trygonometrycznej sinus kąta oraz od ujemnego iloczynu współczynnika  $a=0,2$  i kąta  $\vartheta$  będącego wykładnikiem potęgi o podstawie logarytmu naturalnego  $e$ .

Tabela 4.9. Graficzna prezentacja modelu nr 6 zniekształconego rozkładu prędkości przepływu.

<b>Model nr</b>		<b>6</b>	
$v_6(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-a\vartheta} \cdot \sin\vartheta \right]$			
$K^*_6 = \frac{v_{d6}}{v_{c6}} = \frac{2n^2}{(n+1) \cdot (2n+1)} + \frac{2k^3 \cdot m}{\pi \cdot (k+1) \cdot (2k+1) \cdot (3k+1)} \cdot \frac{1 - e^{-2\pi a}}{a^2 + 1}$ $\frac{n}{n+1} + \frac{k^2 \cdot m \cdot \sin\vartheta}{2 \cdot (k+1) \cdot (2k+1)} \cdot (e^{-a\vartheta} - e^{-a(\vartheta+\pi)})$			
n=7	k=9	$m = -\frac{e^{0,1\pi}}{2}$	a=0,2

Profile prędkości modelu 6 wskazują niesymetryczny rozkład prędkości względem obu osi współrzędnych (OX i OY), przy czym asymetria względem osi OY jest znacząco mniejsza. Profil prędkości 2D wskazuje na przesunięcie maksimum prędkości w kierunku ujemnych wartości Y (-20 , -10 mm) i wartości X w zakresie(-10 , 2 mm). Zniekształcenie profilu prędkości, podobnie jak dla modelu 4 i modelu 5, opisywane jest członem  $e^{-a\vartheta} \cdot \sin\vartheta$ . Kierunek przesunięcia zależy od znaku i wartości parametru m, przyjmującego w tym przypadku wartość dodatnią  $m = \frac{e^{-0,1\pi}}{2}$ , od funkcji trygonometrycznej sinus kąta oraz od ujemnego iloczynu współczynnika  $a=0,2$  i wartości kąta  $\vartheta$  będącego wykładnikiem potęgi o podstawie logarytmu naturalnego  $e$ . W zapisie matematycznym równania model 6 różni się od modelu 5 jedynie wartością współczynnika m ( $m = \frac{e^{0,1\pi}}{2}$  dla modelu 5 i  $m = -\frac{e^{-0,1\pi}}{2}$ ). Przy analizie graficznej i analizie wartości różnice są znaczące. Widoczna jest dużo mniejsza globalna wartość stosunku prędkości  $v/v_0$  ( $K^*$ ) dla modelu 6. Dużo mniejsza jest również maksymalna wartość  $K^*$ . Zauważalne jest też przesunięcie obszaru „mocno zaburzonej prędkości” oraz przesunięcie maksimum prędkości, które można w przybliżeniu opisać jako symetrię względem osi OX.

Tabela 4.10. Graficzna prezentacja modelu nr 7 zniekształconego rozkładu prędkości przepływu.

<b>Model nr</b>		<b>7</b>	
$v_7(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot \vartheta^2 \cdot (2\pi - \vartheta)^2 \right]$			
$K^*_7 = \frac{v_{d7}}{v_{c7}} = \frac{\frac{2n^2}{(n+1) \cdot (2n+1)} + \frac{2k^3 \cdot m}{(k+1) \cdot (2k+1) \cdot (3k+1)} \cdot \frac{16\pi^4}{15}}{\frac{n}{n+1} + \frac{k^2 \cdot m}{2 \cdot (k+1) \cdot (2k+1)} \cdot (\pi^4 + 2\pi^2 \cdot \vartheta^2 - 4\pi\vartheta^3 + 2\pi\vartheta^4)}$			
n=9	k=4	$m = \frac{2}{\pi^5}$	-

Profile prędkości modelu 7 wskazują niesymetryczny rozkład prędkości względem osi współrzędnych OY. Symetria względem osi OX jest zachowana. Profil prędkości 2D wskazuje na przesunięcie maksimum prędkości w kierunku ujemnych wartości X (-20 , -15 mm) i wartości Y w zakresie (-5 , 5 mm). Zniekształcenie profilu prędkości opisywane jest członem  $\vartheta^2 \cdot (2\pi - \vartheta)^2$ . Kierunek przesunięcia zależy od znaku i wartości parametru m, przyjmującego w tym przypadku wartość dodatnią  $m = \frac{2}{\pi^5}$  i wartości kąta  $\vartheta$ .

Tabela 4.11. Graficzna prezentacja modelu nr 8 zniekształconego rozkładu prędkości przepływu.

<b>Model nr</b>		<b>8</b>	
$v_8(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot \vartheta \cdot \cos^2 \vartheta \right]$			
$K^*_8 = \frac{v_{d8}}{v_{c8}} = \frac{2n^2}{(n+1) \cdot (2n+1)} + \frac{2k^3 \cdot m}{(k+1) \cdot (2k+1) \cdot (3k+1)} \cdot \pi$ $\frac{n}{n+1} + \frac{k^2 \cdot m}{2 \cdot (k+1) \cdot (2k+1)} \cdot (\pi + 2\vartheta) \cdot \cos^2 \vartheta$			
n=9	k=4	$m = \frac{1}{\pi^2}$	-

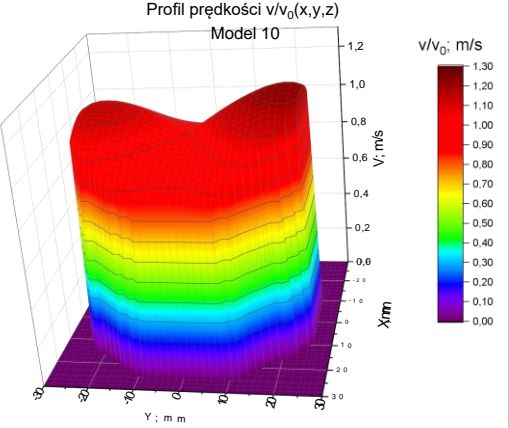
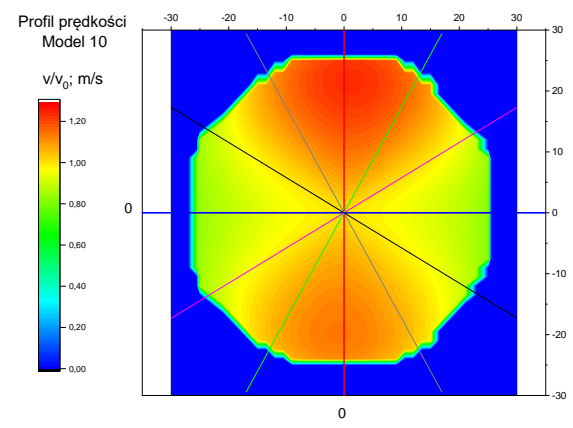
Model 8 należy do grupy rozkładów prędkości z 2 ekstremami (szczytami). Profile prędkości modelu 8 wskazują niesymetryczny rozkład prędkości względem osi współrzędnych OY i OX. Asymetria względem osi OY jest dużo mniejsza niż w przypadku osi OX. Profil prędkości 2D wskazuje na istnienie maksimum prędkości w zakresie Y (-20 , -15 mm) i wartości X w zakresie (-5 , 10 mm). Drugie ekstremum modelu 8 znajduje się w zakresie współrzędnych Y(0 , 15 mm) i X (-5 , 0 mm) i osiąga mniejszą wartość prędkości niż pierwsze ekstremum, będące maksimum funkcji opisującej przepływ w tym modelu. Istnienie 2ekstremów jest dobrze widoczne także na profilu prędkości 3D. Zniekształcenie profilu prędkości opisywane jest członem  $\vartheta \cdot \cos^2 \vartheta$ . Kierunek przesunięcia zależy od znaku i wartości parametru m, przyjmującego w tym przypadku wartość dodatnią  $m = \frac{1}{\pi^2}$  i wartości kąta  $\vartheta$  oraz wartości funkcji cosinus tego kąta  $\cos \vartheta$ .

Tabela 4.12. Graficzna prezentacja modelu nr 9 zniekształconego rozkładu prędkości przepływu.

<b>Model nr</b>		<b>9</b>	
$v_9(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot \theta \cdot (2\pi - \vartheta) \cdot \sin^2 \vartheta \right]$			
$K^*_9 = \frac{v_{d9}}{v_{c9}} = \frac{\frac{2n^2}{(n+1) \cdot (2n+1)} + \frac{2k^3 \cdot m}{(k+1) \cdot (2k+1) \cdot (3k+1)} \cdot \left(\frac{2\pi^2}{3} + \frac{1}{2}\right)}{\frac{n}{n+1} + \frac{k^2 \cdot m}{2 \cdot (k+1) \cdot (2k+1)} \cdot (\pi^2 + 2\pi \cdot \vartheta - 2\vartheta^2)}$			
n=9	k=4	$m = \frac{2}{\pi^3}$	-

Model 9 także należy do grupy rozkładów prędkości z 2 ekstremami (szczytami). Profile prędkości modelu 9 wskazują niesymetryczny rozkład prędkości względem osi współrzędnych OY, choć asymetria jest niewielka. Model 9 wykazuje natomiast symetrię względem osi OX. Profil prędkości 2D wskazuje na istnienie jednego maksimum prędkości w zakresie Y (-20 , -15 mm) i wartości X w zakresie (-5 , 0 mm) oraz drugiego maksimum w zakresie współrzędnych Y(15 , 20 mm) i X (-5 , 0 mm). Istnienie 2 ekstremów jest dobrze widoczne także na profilu prędkości 3D. Zniekształcenie profilu prędkości opisywane jest członem  $\theta \cdot (2\pi - \vartheta) \cdot \sin^2 \vartheta$ . Kierunek przesunięcia zależy od znaku i wartości parametru m, przyjmującego w tym przypadku wartość dodatnią  $m = \frac{2}{\pi^3}$  i wartości kąta  $\vartheta$  oraz wartości funkcji sinus tego kąta  $\sin \vartheta$ .

Tabela 4.13. Graficzna prezentacja modelu nr 10 zniekształconego rozkładu prędkości przepływu.

Model nr		10	
$v_{10}(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-a\vartheta} \cdot \sin^2\vartheta \right]$			
$K^*_{10} = \frac{v_{d10}}{v_{c10}} = \frac{\frac{2n^2}{(n+1) \cdot (2n+1)} + \frac{4k^3 \cdot m}{\pi \cdot (k+1) \cdot (2k+1) \cdot (3k+1)} \cdot \frac{(1 - e^{-2\pi a})}{a \cdot (a^2 + 4)}}{\frac{n}{n+1} + \frac{k^2 \cdot m \cdot \sin^2\vartheta}{2 \cdot (k+1) \cdot (2k+1)} \cdot (e^{-a\vartheta} + e^{-a(\vartheta+\pi)})}$			
n=9	k=9	m=6,813	a=0,1
			

Model 10 podobnie jak modele 8 i 9 należy do grupy rozkładów prędkości z 2 ekstremami (szczytami). Profile prędkości modelu 10 wskazują niesymetryczny rozkład prędkości względem osi współrzędnych OY i OX, choć asymetria jest niewielka.. Profil prędkości 2D wskazuje na istnienie maksimum prędkości w zakresie Y (10 , 25 mm) i wartości X w zakresie (-5 , 5 mm) oraz drugiego ekstremum w zakresie współrzędnych Y(-20 , -15 mm) i X (-5 , 5 mm). W odróżnieniu od modelu 9, wartość drugiego ekstremum jest mniejsza w odniesieniu do ekstremum pierwszego (maksimum). Istnienie 2 ekstremów jest dobrze widoczne także na profilu prędkości 3D. Zniekształcenie profilu prędkości opisywane jest członem  $e^{-a\vartheta} \cdot \sin^2\vartheta$ . Kierunek przesunięcia zależy jest od znaku i wartości parametru m, przyjmującego w tym przypadku wartość dodatnią m=6,813, wartości kąta  $\vartheta$ , wartości funkcji sinus tego kąta  $\sin\vartheta$  oraz od ujemnego iloczynu współczynnika a=0,1 i wartości kąta  $\vartheta$  będącego wykładnikiem potęgi o podstawie logarytmu naturalnego e.



Tabela 4.14. Graficzna prezentacja modelu nr 11 zniekształconego rozkładu prędkości przepływu.

<b>Model nr</b>		<b>11</b>	
$v_{11}(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-a\vartheta} \cdot \sin^2\vartheta \right]$			
$K^*_{11} = \frac{v_{d11}}{v_{c11}} = \frac{\frac{2n^2}{(n+1) \cdot (2n+1)} + \frac{4k^3 \cdot m}{\pi \cdot (k+1) \cdot (2k+1) \cdot (3k+1)} \cdot \frac{(1 - e^{-2\pi a})}{a \cdot (a^2 + 4)}}{\frac{n}{n+1} + \frac{k^2 \cdot m \cdot \sin^2\vartheta}{2 \cdot (k+1) \cdot (2k+1)} \cdot (e^{-a\vartheta} + e^{-a(\vartheta+\pi)})}$			
n=7	k=9	m=e <sup>0,1π</sup>	a=0,2

W zakresie zapisu matematycznego model 11 stanowi analogię modelu 10. Także posiada 2 ekstrema, lecz od modelu 10 odróżnia się wartościami współczynników równania rozkładu prędkości. Profile prędkości modelu 11 wskazują niesymetryczny rozkład prędkości względem osi współrzędnych OY i OX. Asymetria względem osi OY jest niewielka. W odróżnieniu od modelu 10 asymetria względem osi OX jest znaczna. Profil prędkości 2D wskazuje na istnienie maksimum prędkości w zakresie Y (10 , 25 mm) i wartości X w zakresie (-15 , 20 mm) oraz drugiego ekstremum w zakresie współrzędnych Y(-20 , -15 mm) i X (-5 , 5 mm). W stosunku do modelu 10, wartość drugiego ekstremum jest mniejsza w odniesieniu do ekstremum pierwszego (maksimum). Istnienie 2 ekstremów jest dobrze widoczne także na profilu prędkości 3D. Zniekształcenie profilu prędkości opisywane jest członem  $e^{-a\vartheta} \cdot \sin^2\vartheta$ . Kierunek przesunięcia zależy od znaku i wartości parametru m, przyjmującego w tym przypadku wartość dodatnią  $m=e^{0,1\pi}$ , wartości kąta  $\vartheta$ , wartości funkcji sinus tego kąta  $\sin\vartheta$  oraz od ujemnego iloczynu współczynnika  $a=0,2$  i wartości kąta  $\vartheta$  będącego wykładnikiem potęgi o podstawie logarytmu naturalnego  $e$ .

Tabela 4.15. Graficzna prezentacja modelu nr 12 zniekształconego rozkładu prędkości przepływu.

Model nr		12	
$v_{12}(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-a\vartheta} \cdot \sin\vartheta \right]$			
$K^*_{12} = \frac{v_{d12}}{v_{c12}} = \frac{2n^2}{(n+1) \cdot (2n+1)} + \frac{2k^3 \cdot m}{\pi \cdot (k+1) \cdot (2k+1) \cdot (3k+1)} \cdot \frac{1 - e^{-2\pi a}}{a^2 + 1}$ $\frac{n}{n+1} + \frac{k^2 \cdot m \cdot \sin\vartheta}{2 \cdot (k+1) \cdot (2k+1)} \cdot (e^{-a\vartheta} - e^{-a(\vartheta+\pi)})$			
n=9	k=0,5	m=-6,7501	a=0,5

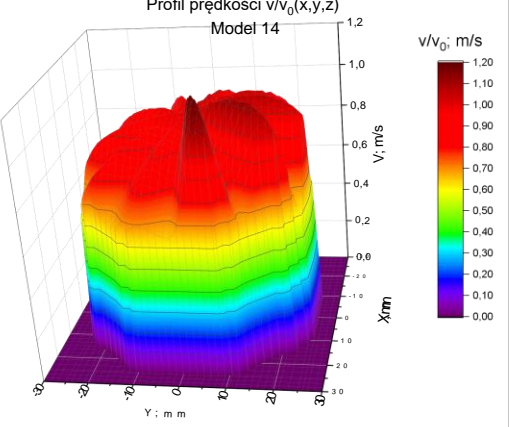
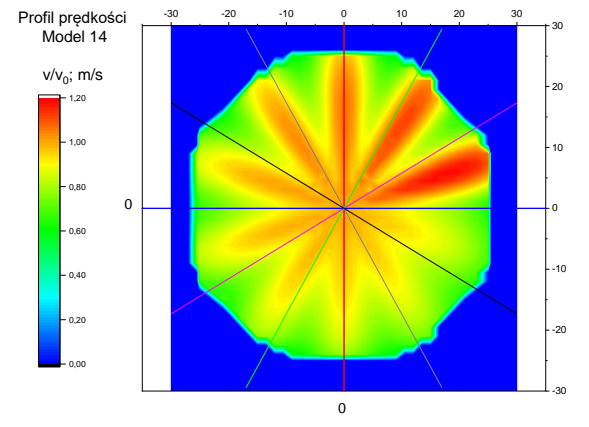
Zgodnie z [76] [108] model 12 jest zaliczany do grupy modeli z 3 szczytami. Wizualizacja tego modelu w postaci profili prędkości w wymiarze 2D i 3D pozwala dostrzec jednak jedynie 2 ekstrema prędkości: minimum i maksimum. Odróżnia to model 12 od modeli 9, 10 i 11. Profile prędkości modelu 12 wskazują niesymetryczny rozkład prędkości względem osi współrzędnych OY i OX. Profil prędkości 2D wskazuje na istnienie maksimum prędkości w zakresie Y (-10 , -5 mm) i wartości X w zakresie (-5, 0 mm). Natomiast minimum prędkości znajduje się w zakresie współrzędnych Y(5 , 15 mm) i X (0 , 10 mm). Strefy podwyższonej i obniżonej prędkości tworzą 2 wyraźnie wyodrębnione obszary profilu prędkości. Istnienie 2 ekstremów jest dobrze widoczne także na profilu prędkości 3D. Zniekształcenie profilu prędkości opisywane jest członem  $e^{-a\vartheta} \cdot \sin\vartheta$ . W odróżnieniu od modelu 11 w członie tym występuje  $\sin\vartheta$  zamiast  $\sin^2\vartheta$ . Kierunek przesunięcia zależy od znaku i wartości parametru m, przyjmującego w tym przypadku wartość ujemną  $m=-6,7501$ , wartości kąta  $\vartheta$ , wartości funkcji sinus tego kąta  $\sin\vartheta$  oraz od ujemnego iloczynu współczynnika  $a=0,5$  i wartości kąta  $\vartheta$  będącego wykładnikiem potęgi o podstawie logarytmu naturalnego e.

Tabela 4.16. Graficzna prezentacja modelu nr 13 zniekształconego rozkładu prędkości przepływu.

<b>Model nr</b>		<b>13</b>	
$v_{13}(r, \vartheta) = v_o \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot (2\pi - \vartheta)^2 \cdot \vartheta \cdot \sin 3\vartheta \right]$			
$K^*_{13} = \frac{v_{d13}}{v_{c13}} = \frac{\frac{2n^2}{(n+1) \cdot (2n+1)} + \frac{2k^3 \cdot m}{(k+1) \cdot (2k+1) \cdot (3k+1)} \cdot \frac{4}{9}}{\frac{n}{n+1} + \frac{k^2 \cdot m \cdot \sin 3\vartheta}{2 \cdot (k+1) \cdot (2k+1)} \cdot (5\pi^2\vartheta - 3\pi\vartheta^2 - \pi^3)}$			
n=7	k=9	m= $\frac{1}{2\pi^2}$	-

Model 13 jest modelem rozkładu prędkości z 3 ekstremami, które są wyraźnie widoczne na utworzonych profilach prędkości. Profile prędkości modelu 12 wskazują niesymetryczny rozkład prędkości względem osi współrzędnych OY i OX. Profil prędkości 2D wskazuje na istnienie maksimum prędkości w zakresie Y (5 , 20 mm) i wartości X w zakresie (-25 , -10 mm). Ponadto wyróżnić można jeszcze 2 ekstrema, które osiągają jednak dużo mniejsze wartości prędkości. Oprócz wymienionych obszarów podwyższonej prędkości profile pokazują wyraźnie istnienie stref obniżonej, czy wręcz ujemnej (wstecznej) prędkości. Zniekształcenie profilu prędkości opisywane jest członem  $(2\pi - \vartheta)^2 \cdot \vartheta \cdot \sin 3\vartheta$ . Kierunek przesunięcia zależy od znaku i wartości parametru m, przyjmującego w tym przypadku wartość dodatnią  $m = \frac{1}{2\pi^2}$ , wartości kąta  $\vartheta$  oraz wartości funkcji sinus potrójonego kąta  $\sin 3\vartheta$ .

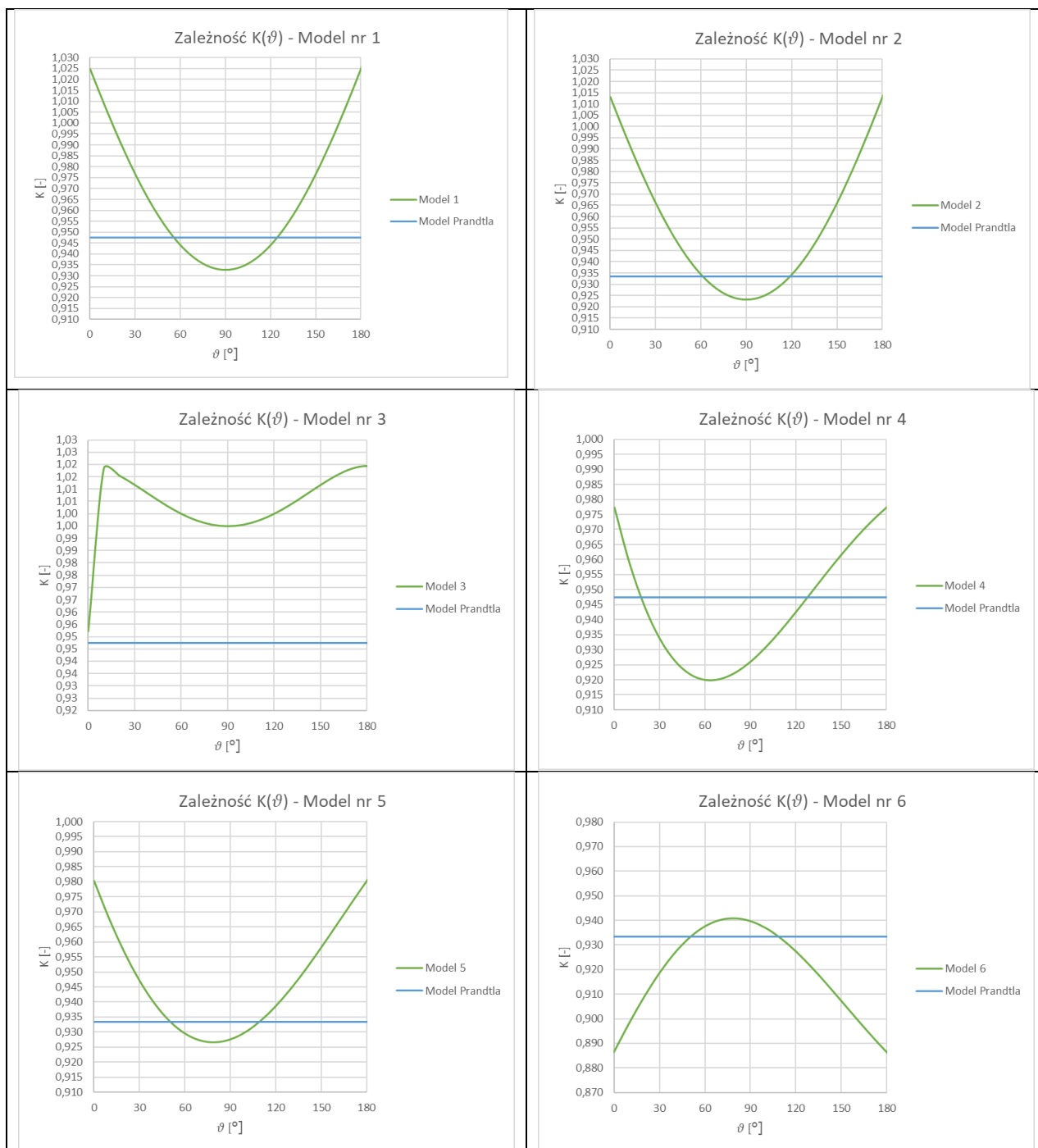
Tabela 4.17. Graficzna prezentacja modelu nr 14 zniekształconego rozkładu prędkości przepływu.

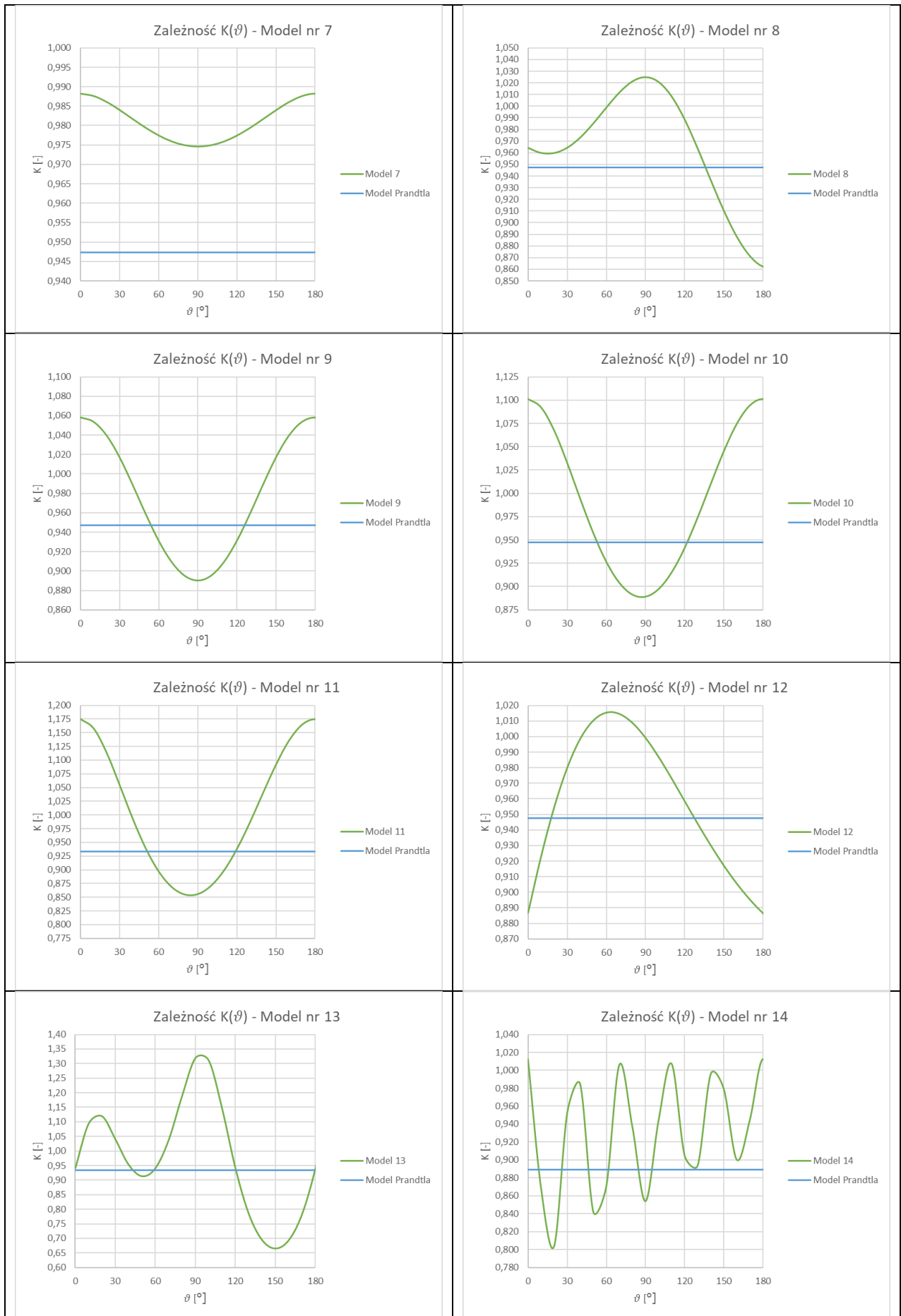
<b>Model nr</b>		<b>14</b>	
$v_{14}(r, \vartheta) = v_0 \cdot \left[ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + m \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-a\vartheta} \cdot \sin^2 5\vartheta \right]$			
$K^*_{14} = \frac{v_{d14}}{v_{c14}} = \frac{\frac{2n^2}{(n+1) \cdot (2n+1)} + \frac{100k^3 \cdot m}{\pi \cdot (k+1) \cdot (2k+1) \cdot (3k+1)} \cdot \frac{(1 - e^{-2\pi a})}{a \cdot (a^2 + 100)}}{\frac{n}{n+1} + \frac{k^2 \cdot m \cdot \sin^2 5\vartheta}{2 \cdot (k+1) \cdot (2k+1)} \cdot (e^{-a\vartheta} + e^{-a(\vartheta+\pi)})}$			
n=4	k=9	$m = \frac{e^{0,15\pi}}{2}$	a=0,3
			

Model 14 jest także modelem rozkładu prędkości z przynajmniej 3 ekstremami, które są wyraźnie widoczne na utworzonych profilach prędkości. Profile prędkości modelu 12 wskazują niesymetryczny rozkład prędkości względem osi współrzędnych OY i OX. Analizując profile prędkości można wyróżnić kilka stref podwyższonej prędkości. Zniekształcenie profilu prędkości opisywane jest członem  $e^{-a\vartheta} \cdot \sin^2 5\vartheta$ . Kierunek przesunięcia zależy od znaku i wartości parametru m, przyjmującego w tym przypadku wartość dodatnią  $m = \frac{e^{0,15\pi}}{2}$ , wartości kąta  $\vartheta$ , wartości funkcji sinus pięciokrotności kąta  $\vartheta \sin 5\vartheta$  oraz od ujemnego iloczynu współczynnika  $a=0,3$  i wartości kąta  $\vartheta$  będącego wykładnikiem potęgi o podstawie logarytmu naturalnego e.

Na wykresach zamieszczonych w tabeli 4.18 przedstawiono zależność wartości współczynnika kształtu rozkładu prędkości  $K^*$  w funkcji współrzędnej kątowej  $\vartheta$  dla poszczególnych modeli rozkładów prędkości. Liniami ciągłymi zaznaczono wartości współczynnika  $K^*(\vartheta)$  wyznaczone w zakresie kątów  $\vartheta < 0^\circ; 180^\circ$  dla rozkładu prędkości opisanego dla niezniekształconego przepływu turbulentnego wzorem Prandtla (4.7), a dla przepływu o zniekształconym profilu prędkości wzorem odpowiedniego modelu prędkości. Wykresy będą w dalszej części rozprawy służyć porównaniom z rzeczywistymi profilami prędkości za przeszkodą w postaci zasowy nożowej. Przebieg zależności  $K^*(\vartheta)$  dla modeli rozkładów prędkości będzie porównywany z przebiegiem zależności  $K_{rz}^*(\vartheta)$  dla danych eksperymentalnych.

Tabela 4.18 Zestawienie wykresów zależności  $K^*(\vartheta)$  stworzonych dla modeli nr 1-14 zniekształconych rozkładów prędkości.





Zamieszczone w tabelach 4.4-4.17 i opisane w postaci analizy rozkładów prędkości wykresy 2D i 3D dla analizowanych modeli nr 1-14 pozwoliły na określenie charakterystycznych cech poszczególnych modeli. Opisane wcześniej obserwacje pokrywają się z wnioskami z analizy wykresów zmienności wartości współczynnika  $K^*$  zamieszczonych w tabeli 4.18.

## 5. Przeprowadzenie badań – pomiar prędkości przepływu

Część badawcza zrealizowanej pracy dotyczyła przeprowadzenia pomiarów prędkości przepływu przy użyciu przepływomierza ultradźwiękowego w niestandardowych warunkach pomiaru za zasuwą nożową. Pomiary wykonywane były w warunkach niestandardowych tj. bez zachowania określonych w normach odcinków prostych. W czasie wykonywania pomiaru prędkości za przeszkodą w postaci zasuw, równocześnie prowadzono pomiar prędkości w obszarze przepływu niezaburzonego, z zachowaniem wymaganych odcinków prostych. Pomiar referencyjny prowadzony był przepływomierzem tego samego typu co za zasuwą i służył późniejszemu określeniu wartości współczynnika  $K_{rz}^*$  dla mierzonego przepływu. Wyznaczone wartości rzeczywistego współczynnika  $K_{rz}$  mogły być następnie porównane z obliczonymi wartościami współczynnika  $K^*$  dla modeli teoretycznych rozkładów prędkości.

Celem eksperymentu i późniejszej analizy porównawczej ze znanymi modelami rozkładów prędkości zniekształconego przepływu turbulentnego była identyfikacja profilu prędkości za źródłem zaburzenia w postaci zasuw nożowej. Wyznaczanie i wykorzystywanie teoretycznej wartości współczynnika  $K^*$  na podstawie znanego równania rozkładu prędkości może być sposobem kompensacji błędu pomiarowego w przypadku wykonywania pomiarów przepływu w warunkach niestandardowych. Pomiary doświadczalne służyły więc weryfikacji postawionych hipotez badawczych.

Pomiary prędkości przepływu przepływomierzem ultradźwiękowym zostały dodatkowo poszerzone o badania z użyciem anemometrii laserowej i poznanie punktowych wartości prędkości w wybranych przekrojach pomiarowych. Pozwoliło to na stworzenie wykresów rzeczywistego rozkładu prędkości za zasuwą nożową i porównaniu ich z profilami prędkości wygenerowanymi dla rozpatrywanych modeli, zamieszczonymi w rozdziale 3.

### 5.1 Stanowisko badawcze

Przy wykonywaniu pomiarów skorzystano z istniejącego stanowiska pomiarowego, zbudowanego w celu prowadzenia badań naukowych dotyczących pomiaru przepływu w warunkach niestandardowych, za różnymi przeszkodami w postaci elementów armatury hydraulicznej takimi jak kolana hydrauliczne, przepustnice i zawory, zwężki, konfuzory i dyfuzory. Zaletą skonstruowanej instalacji jest możliwość dokonywania pomiarów przy użyciu przepływomierza ultradźwiękowego z głowicami nakładanymi zarówno na odcinkach poziomych, jak i pionowych rurociągu. Stanowisko zostało dostosowane do zaplanowanych prac pomiarowych przez montaż zasuw nożowej. Instalacja stwarzała możliwość wykonania badań dla różnych wartości strumienia objętości przepływu w obszarze przepływu turbulentnego, różnych stopni przymknięcia zasuw oraz w różnych odległościach za zasuwą w zakresie  $3D - 15D$ . Po przeprowadzeniu części badań związanej z pomiarami przepływu metodą ultradźwiękową, stanowisko zostało przystosowane do użycia anemometru laserowego.

Kluczowym elementem dla przeprowadzenia badań była zasuw nożowa (rys. 5.1), której przymknięcie powodowało zaburzenie przepływu, którego wpływ na wyniki pomiarów prędkości przepływu chciano zaobserwować. Zasuwę nożową jako przedmiot zainteresowania badawczego w niniejszej rozprawie doktorskiej wybrano z uwagi na powszechność zastosowań. Przypadek zaburzenia przepływu przez zasuwę nożową występuje często w przemyśle energetycznym, czy też w instalacjach kotłowych lub hydraulicznych, w których



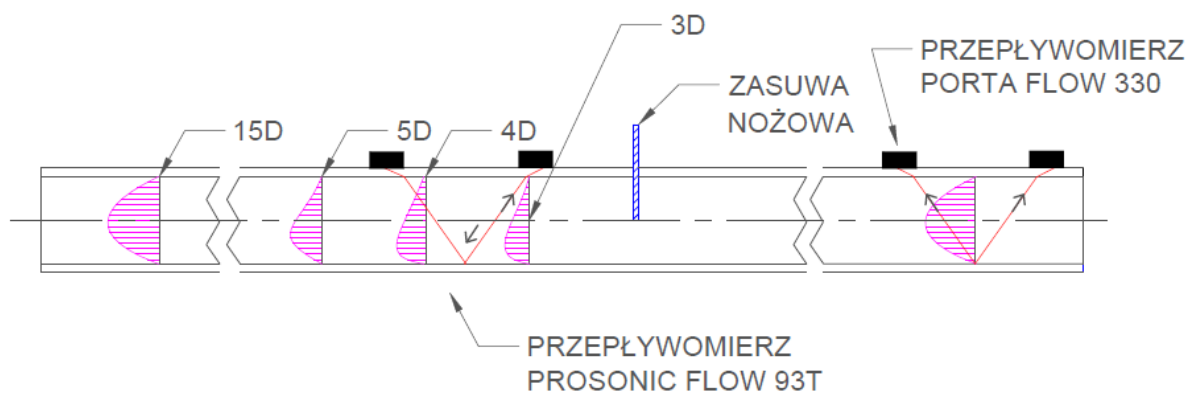
montowane są wspomniane zasuwy. Znajdują one zastosowanie także m.in. w przemyśle chemicznym, metalurgii oraz w górnictwie. Do zalet zasuwy nożowej należą prosta budowa oraz wymienne gniazdo zaworu, łatwość montażu, małe rozmiary, elastyczność działania oraz mały spadek ciśnienia przy pełnym otwarciu. Zasuwy nożowe są używane szczególnie do cieczy zabrudzonych, przy magazynowaniu szlamu i lepkich, gęstych mediów. Przeznaczeniem zastosowania zasuw nożowych są instalacje niskociśnieniowe, co stanowi ograniczenie w ich powszechnym używaniu.



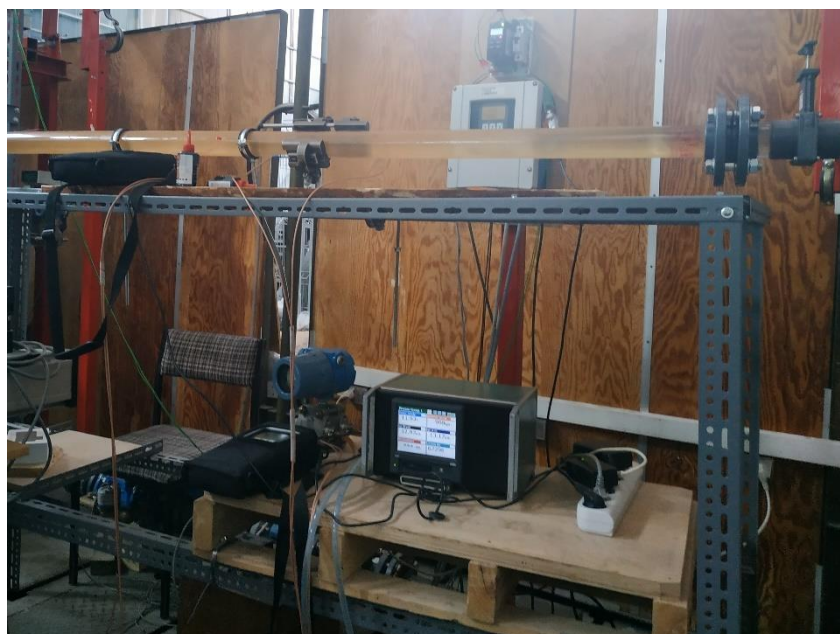
*Rys. 5.1. Zasuwa nożowa międzykolnierzowa PVC DN50.*

Instalacja badawcza została zbudowana z rur PCV o średnicy wewnętrznej  $D = 50$  mm i grubości ścianki  $g = 5$  mm. Zastosowanie rur o stosunkowo niskiej chropowatości pozwalało uniknąć znaczących zaburzeń prędkości przy ściankach rurociągu. Pozwoliło to na uproszczeniu analizy rozkładu prędkości w rurze i uproszczenia równań modeli rozkładów prędkości przez pominięcie wpływu chropowatości, czy też osadów (pomiaru wykonywano bezpośrednio po wymianie rur na nowe). Ponadto zapewniono przezroczystość odcinka rurociągu znajdującego się bezpośrednio za zasuwą nożową, w celu wykonania anemometrii laserowej i identyfikacji rozkładu prędkości. Cieczą przepływającą w instalacji była woda.

W skład instalacji pomiarowej wchodziły przepływomierz referencyjny, mierzący prędkość w obszarze przepływu niezaburzonego na prostym odcinku rurociągu oraz przepływomierz Endres+Hauser Prosonic Flow 93T, przy użyciu którego mierzono prędkość przepływu w obszarze zaburzonym za zasuwą nożową. Oprócz wspomnianych przepływomierzy na stanowisku zamontowane były inne urządzenia pomiarowe, wykorzystywane jako urządzenia kontrolne. Były nimi wodomierz MWN/JS 50/4.0 S NK, przepływomierz elektromagnetyczny Promag 53W [113] [114] [115], kryza ISA, przetwornik ciśnienia różnicowego PNEFAL Rosemount 1151 [116] oraz termoelement rezystancyjny Pt100. Ich wskazania, monitorowane poprzez rejestrator ekranowy LUMEL KD7 [117] [118], pozwalały zachować stałe parametry eksperymentu (w przybliżeniu stałe: strumień objętości przepływu  $q_v$  i liczba Reynoldsa przepływu  $Re$ , temperatura i gęstość wody). Strumień objętości przepływu, w razie potrzeby skorygowany do wartości wyjściowej w danej serii pomiarowej, korygowany był przez zmianę prędkości obrotowej (biegu) pompy.



Rys. 5.2. Schemat pomiaru prędkości przy zniekształconym rozkładzie prędkości za zasuwą nożową, przy 1/2 wysokości zamknięcia zasuwki nożowej i ustawieniu głowic przepływomierza za zasuwą (Prosonic Flow 93T) w układzie typu V.



Rys. 5.3. Stanowisko badawcze w trakcie wykonywania pomiarów

## 5.2 Metodyka przeprowadzania badań

Do wykonania pomiarów użyto dwóch przepływomierzy typu transit-time o tej samej dokładności wskazań, aby określić wpływ zaburzeń na wskazania przepływomierzy o takich samych właściwościach metrologicznych. Na prostym odcinku rurociągu przed zasuwą nożową, w wymaganej odległości od przeszkody, zamontowano w stałym położeniu przepływomierz Microsonic Porta Flow 330 (rys. 5.4). Głowice tego przepływomierza zamontowane zostały w układzie typu V, dającego większą dokładność pomiaru niż układ typu Z, ponieważ podwójne przejście fali ultradźwiękowej minimalizuje wpływ ewentualnych zaburzeń w przestrzeni mierzonej przepływu.



Rys. 5.4. Przepływomierz Microsonic PortaFlow 330, służący do pomiaru prędkości na prostym odcinku rurociągu przed zasuwą nożową.

Przepływomierz PortaFlow 330 służył jako przepływomierz referencyjny, z jego wskazaniami porównywano wskazania przepływomierza zamontowanego za zasuwą nożową. Za zasuwą zamontowano przepływomierz Endress+Hauser Prosonic Flow 93T (rys. 5.5). Parametry metrologiczne obu przepływomierzy zawiera tabela 5.1.

Rys. 5.5 a)



Rys. 5.5 b)

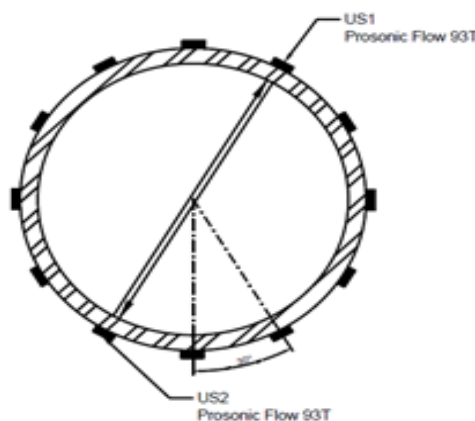


Rys. 5.5 a) Przepływomierz Endress+Hauser Prosonic Flow 93T, służący do pomiaru prędkości w obszarze przepływu zaburzonego, za zasuwą nożową. Rys. 5.5 b) Montaż głowic przepływomierza Endress+Hauser Prosonic Flow 93T w układzie typu Z.

Tabela 5.1. Zestawienie właściwości metrologicznych przepływomierzy ultradźwiękowych używanych podczas wykonywania pomiarów.

Przepływomierz	Micronics Porta Flow 330	E+H Prosonic Flow 93T
Typ	transit-time	transit-time
Wielkość mierzona	prędkość przepływu v	prędkość przepływu v
Zakres pomiarowy	0 -20 m/s	0-15 m/s
Błąd graniczny $\delta_{gr}$	2% $v_{sr}$	2% $v_{sr} \pm 7,5$ mm/s
Ustawienie głowic	V	V/Z

Systematycznie zwiększano odległość przepływomierza Prosonic Flow 93T od zasuwy o odległość średnicy rurociągu D, w zakresie przekrojów pomiarowych 3D - 15D. Wykonanie pomiarów w przekrojach pomiarowych 0D - 2D było niemożliwe z powodu ograniczeń geometrycznych uniemożliwiających montaż głowic pomiarowych. W obrębie przeprowadzania pomiaru w jednym przekroju pomiarowym zmieniano położenie głowic przepływomierza Prosonic Flow 93T w zakresie wartości kąta  $\alpha = 0^\circ - 360^\circ$  (rys. 5.6), obracając głowice stopniowo o  $30^\circ$  wokół poziomej osi rurociągu. Pomiary wykonano dla 2 różnych sposobów montażu przepływomierza: w układzie głowic ultradźwiękowych V oraz w układzie głowic ultradźwiękowych Z (rys. 5.5 b).



Rys. 5.6. Schemat przedstawiający sposób ustawienia głowic ultradźwiękowych w różnych pozycjach kątowych ( $\alpha$ ) w obrębie jednego przekroju pomiarowego.

Pomiarów dokonywano każdorazowo w serii pomiarowej trwającej 5 minut, z czasem uśredniania pomiaru 5 sekund. Dla każdej serii pomiarowej obliczono uśrednione wartości prędkości zmierzonej przed zasuwą  $v_p$  i za zasuwą  $v_z$ . W celu wyznaczenia rzeczywistego bezwymiarowego współczynnika opisującego stopień zaburzenia przepływu  $K_{rz}^*$  posłużono się stosunkiem prędkości średnich przed zasuwą  $v_p$  i za zasuwą  $v_z$  (5.1). Współczynnik  $K_{rz}^*$  stanowi analogię do współczynnika  $K^*$  wyznaczanego w rozdziale 3 dla teoretycznych modeli rozkładów prędkości. Porównanie tych 2 wielkości pozwoli na identyfikację modelu rozkładu

prędkości najwierniej opisującego rozkład prędkości zniekształcony przez wpływ zasuw nożowej.

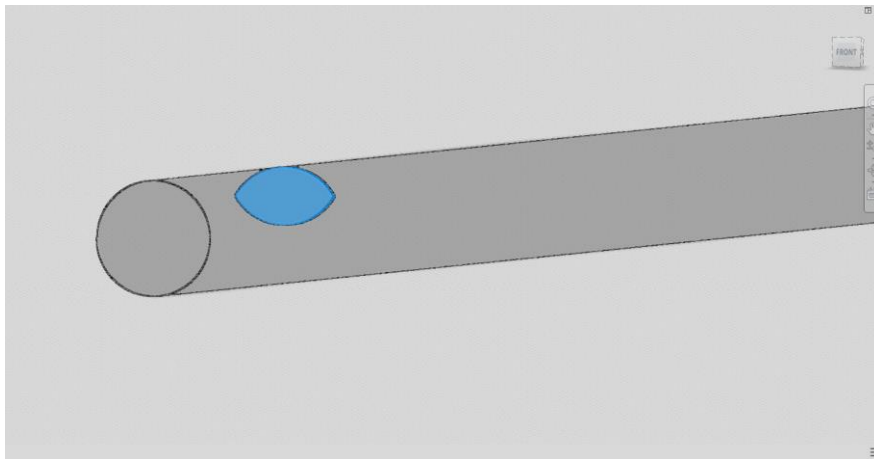
$$K_{rz}^* = \frac{v_p}{v_z} \quad (5.1)$$

Przedstawiony powyżej algorytm przeprowadzania badań przeprowadzono dla 2 różnych przepływów: dla liczby Reynoldsa  $Re$  na poziomie 35 000 oraz 70 000. Rozpatrywany zakres wartości liczby Reynoldsa  $Re$  pozwolił na zweryfikowanie uniwersalności postawionej w niniejszej rozprawie tezy. Strumień objętości przepływu regulowano za pomocą ustawiania prędkości obrotowej pompy tłoczącej ciecz w obiegu zamkniętym. W czasie wykonywania pomiarów starano się utrzymać stałą wartość strumienia przepływu. Było to utrudnione przez zmiany temperatury otoczenia oraz cieczy podczas badań. Wahania temperatury wody determinowały zmienność gęstości medium, co zgodnie z równaniem przetwarzania przepływomierza rzutowało na finalną wartość strumienia przepływu [16]. Opisane wahania nie wpływały na otrzymane wartości współczynnika  $K_{rz}^*$ , ponieważ wartość prędkości przed zasuwą  $v_p$  każdorazowo odnoszona była do prędkości zmierzonej za zasuwą  $v_z$ , co pozwalało kompensować wahania strumienia przepływu.

Podczas wykonywania pomiarów przy użyciu przepływomierzy ultradźwiękowych skupiono się jedynie na pomiarze i późniejszej analizie jedynie wartości prędkości. Prędkość stanowi parametr podstawowy w procesie zmierzającym do obliczenia wartości strumienia przepływu, który znając wartość prędkości można obliczyć zgodnie z równaniem przetwarzania przepływomierza.

### 5.3 Analiza metrologiczna przepływomierza ultradźwiękowego w pomiarach za zasłoną nożową

Prace eksperymentalne zostały przeprowadzone zgodnie z algorytmem opisanym w poprzednim rozdziale. Poniżej zostały przedstawione wyniki pomiarów oraz rezultaty obliczeń, a także graficzne opracowanie tych danych. Dla przejrzystości analizy danych pomiarowych ich prezentację podzielono na serię badań wykonanych dla 2 różnych stopni przymknięcia zasuw nożowej: 1/3 zamknięcia i 1/2 zamknięcia. W obrębie obu serii przedstawiono badania wykonane dla 2 różnych wartości strumienia objętości przepływu przy liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$  i  $Re \approx 70\ 000$  i dla 2 różnych ustawień głowic ultradźwiękowych w układzie V i Z.



Rys. 5.7. Wizualizacja warunków przeprowadzania pomiaru dla zasłonięcia 1/2 wysokości zasuw nożowej.

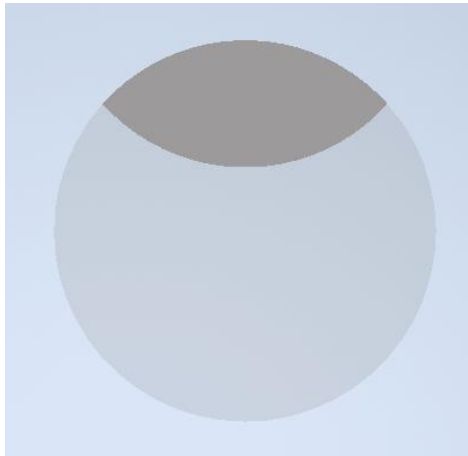
W celu wyznaczenia powierzchni czynnej przepływu przy 1/3 (5.2) i 1/2 (5.3) zamknięcia zasuw dokonano operacji całkowania. Otrzymane pola powierzchni odniesiono do pola powierzchni przekroju rurociągu przy całkowicie otwartej zasuwie.

$$P_{\frac{1}{3}} = \frac{1}{2} \cdot \pi r^2 + 2 \cdot \int_0^{18,63} dx \int_{8,33}^{33,33 - \sqrt{25-x^2}} dy = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 25^2 + 2 \cdot \int_0^{18,63} dx \int_{8,33}^{33,33 - \sqrt{25-x^2}} dy \quad (5.2)$$

$$P_{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \cdot \pi r^2 + 2 \cdot \int_0^{21,65} dx \int_0^{25 - \sqrt{25-x^2}} dy = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 25^2 + 2 \cdot \int_0^{21,65} dx \int_0^{25 - \sqrt{25-x^2}} dy \quad (5.3)$$

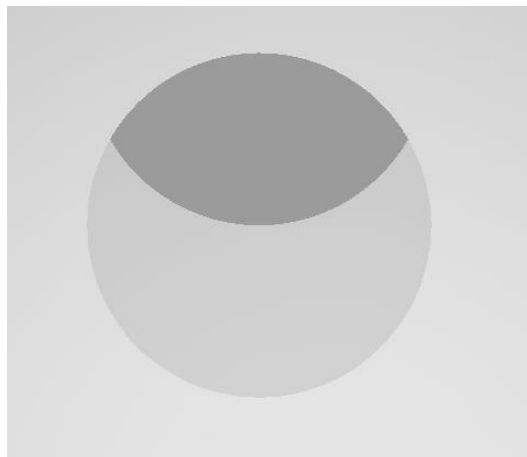
Przeprowadzone obliczenia pozwoliły na uzyskanie następujących rezultatów:

- przy ustawieniu zasuw w pozycji zasłonięcia  $\frac{1}{3}$  wysokości zasuw nożowej uzyskujemy  $P_{\frac{1}{3}} = 78,09\%$  czynnej powierzchni przepływowej,



Rys. 5.8. Przekrój rurociągu przy ustawieniu w pozycji zasłonięcia  $\frac{1}{3}$  wysokości zasuw nożowej.

- przy ustawieniu zasuw w pozycji zasłonięcia  $\frac{1}{2}$  wysokości zamknięcia zasuw nożowej uzyskujemy  $P_{\frac{1}{2}} = 60,89\%$  czynnej powierzchni przepływowej.



Rys. 5.9. Przekrój rurociągu przy ustawieniu w pozycji zasłonięcia  $\frac{1}{2}$  wysokości zasuw nożowej.

## 6. Wyniki pomiarów

W rozdziałach 6.1 - 6.2 przedstawione zostały dane pomiarowe, wyniki obliczeń i stworzone na ich podstawie wykresy. Rozdziały 6.1 i 6.2 zostały podzielone na podrozdziały, zgodnie z wykonaniem pomiarów przy określonym zamknięciu zasuw oraz przy określonej liczbie Reynoldsa. W rozdziale 6.3 przedstawione zostały obliczenia prowadzące do wyznaczenia niepewności pomiaru prędkości przepływu. Na zamieszczonych w rozdziale 6 wykresach zaprezentowano zależność zmierzonych wartości prędkości przepływu od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych  $\alpha$  oraz od odległości przekroju pomiarowego  $d$  od zasuw nożowej (mierzonej jako wielokrotności średnicy rurociągu  $D$ ). W rozdziale 6.1 zostały zaprezentowane wyniki pomiarów wykonanych przy 1/3 zamknięcia zasuw nożowej, natomiast w rozdziale 6.2 przedstawiono wyniki pomiarów wykonanych przy 1/3 zamknięcia zasuw nożowej.

### 6.1 Wyniki pomiarów prędkości przy 1/3 zamknięcia zasuw

Poniżej zamieszczono wyniki pomiarów wykonanych według opisanej w rozdziale 5 metodyki. W tabelach pomiarowych umieszczone zostały uśrednione wartości zmierzone  $v_p$  i  $v_z$  oraz obliczone wg wzoru (5.1) wartości współczynnika kształtu rozkładu prędkości  $K_{rz}^*$ . Dla każdego przekroju pomiarowego na podstawie wspomnianych danych stworzone zostały wykresy przebiegu zależności  $v(\alpha)$  i  $K_{rz}^*(\alpha)$ . Przy ich analizie skupiono się na ocenie przebiegu funkcji  $K_{rz}^*(\alpha)$ , która stanowi stosunek wartości prędkości  $v_p$  i  $v_z$ . W obrębie jednej serii pomiarowej dla danego przekroju pomiarowego  $D$  prędkość mierzona przed zasuwą  $v_p$  przyjmuje stałą wartość, dlatego na zmianę wartości współczynnika kształtu rozkładu prędkości  $K_{rz}^*$  wpływają bezpośrednio zmiany przebiegu funkcji  $v_z(\alpha)$  dla poszczególnych kątów pomiarowych  $\alpha$ . Zmiana wartości  $K_{rz}^*$  jest odwrotnie proporcjonalna do zmian wartości  $v_z$ . Z opisanego powodu, dla zapewnienia klarowności formułowanych wniosków, przy dyskusji wyników badań dla poszczególnych przekrojów pomiarowych ograniczono się jedynie do opisu zmian zależności  $K_{rz}^*(\alpha)$ .

#### 6.1.1 Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 35\ 000$ i układzie głowic Z

Poniżej w rozdziale 6.1.1 zamieszczono wyniki pomiarów i obliczeń dla serii pomiarowej wykonanej przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw nożowej, przy liczbie Reynoldsa przepływu  $Re \approx 35\ 000$  i ustawieniu głowic przepływomierza ultradźwiękowego typu Z. W tabelach 6.1-6.11 zostały umieszczone wykresy stworzone na podstawie danych pomiarowych oraz rezultatów obliczeń.



Tabela 6.1. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 3D.

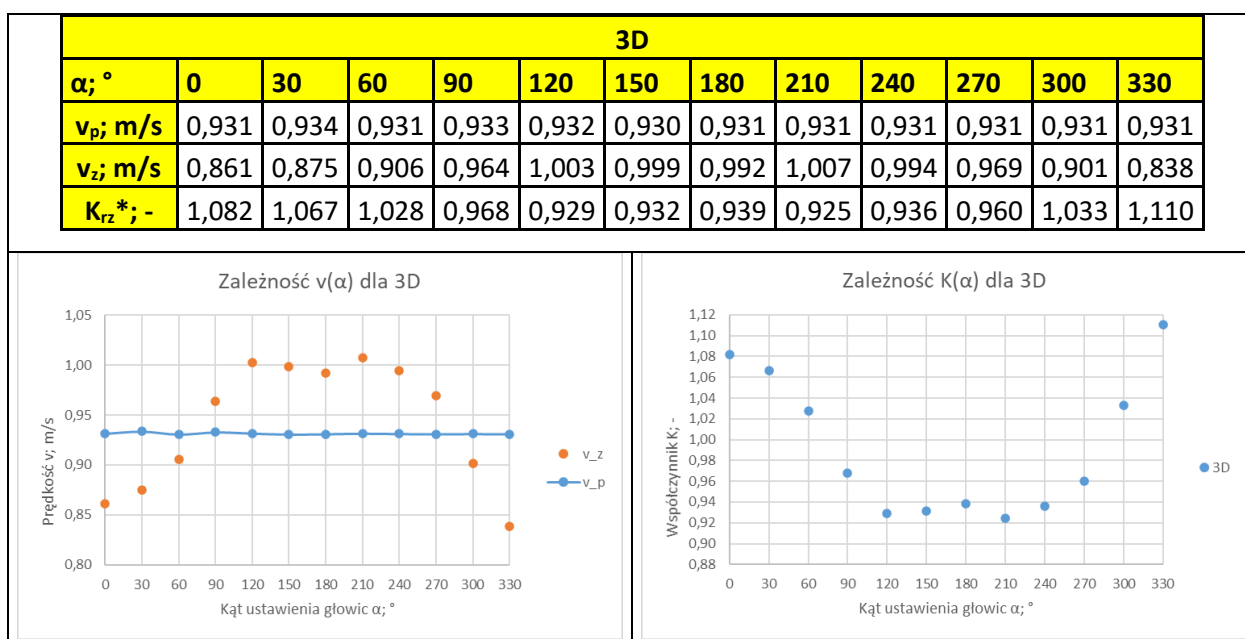


Tabela 6.2. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 4D.

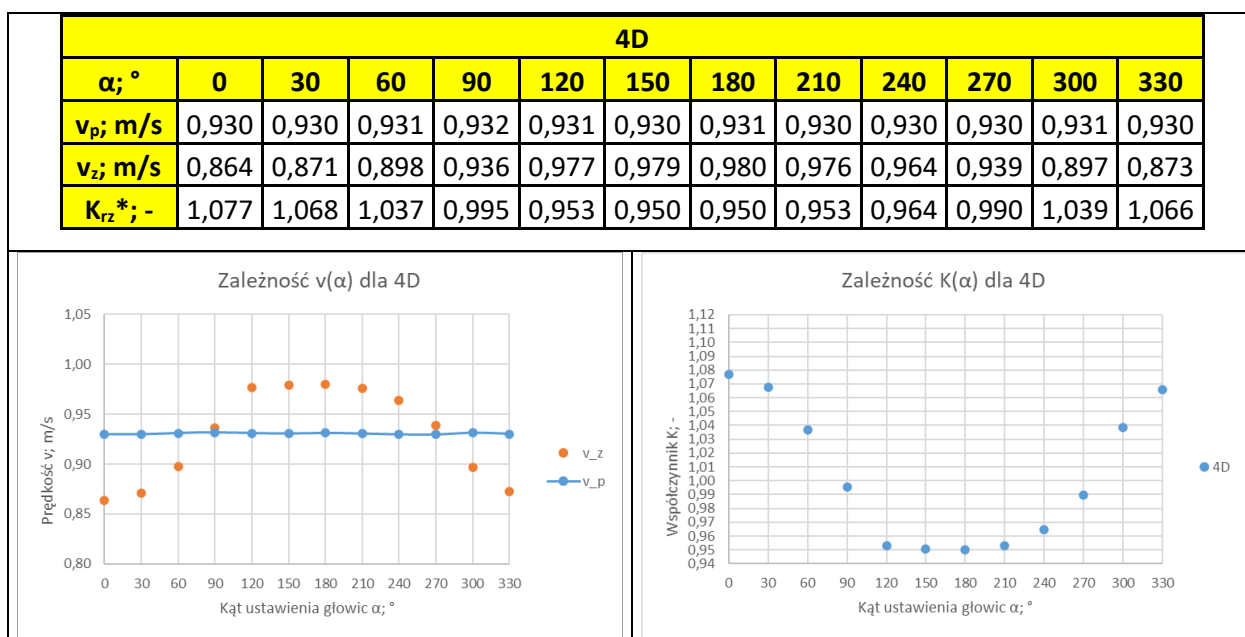


Tabela 6.3. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 5D.

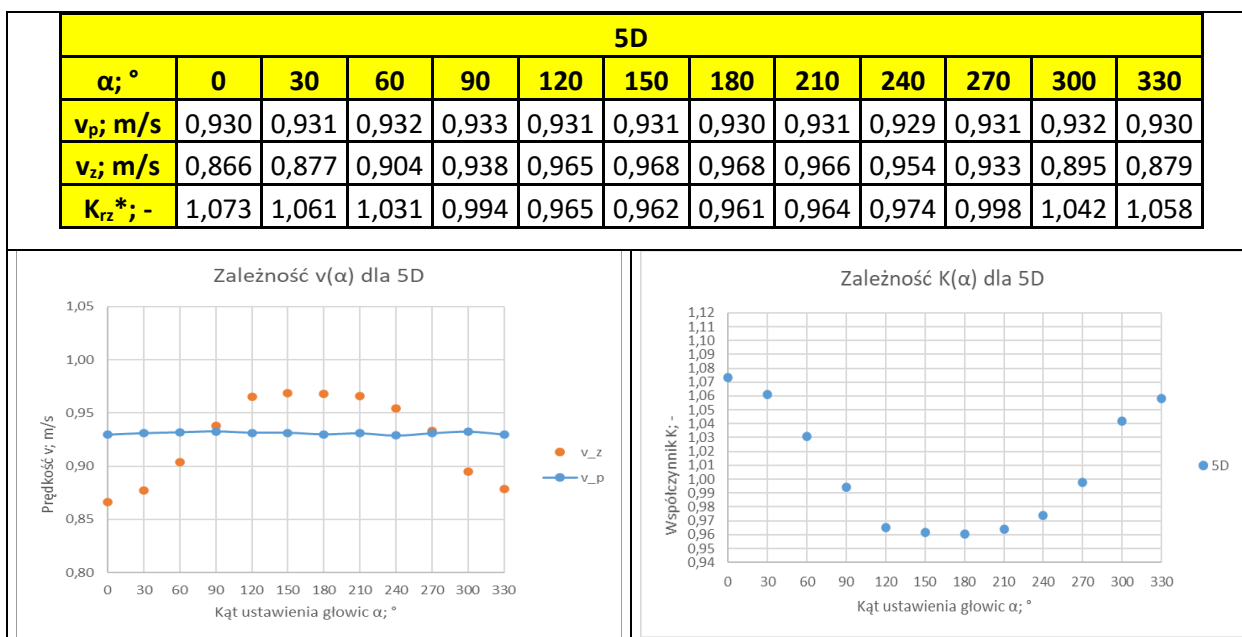


Tabela 6.4. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 6D.

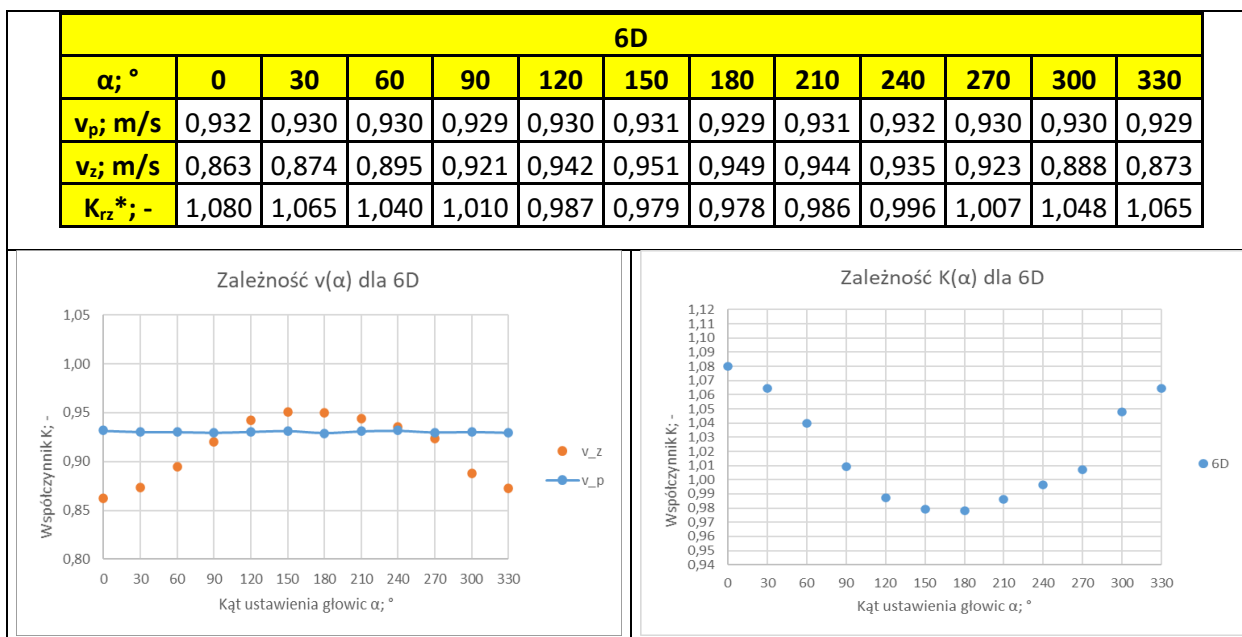


Tabela 6.5. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 7D.

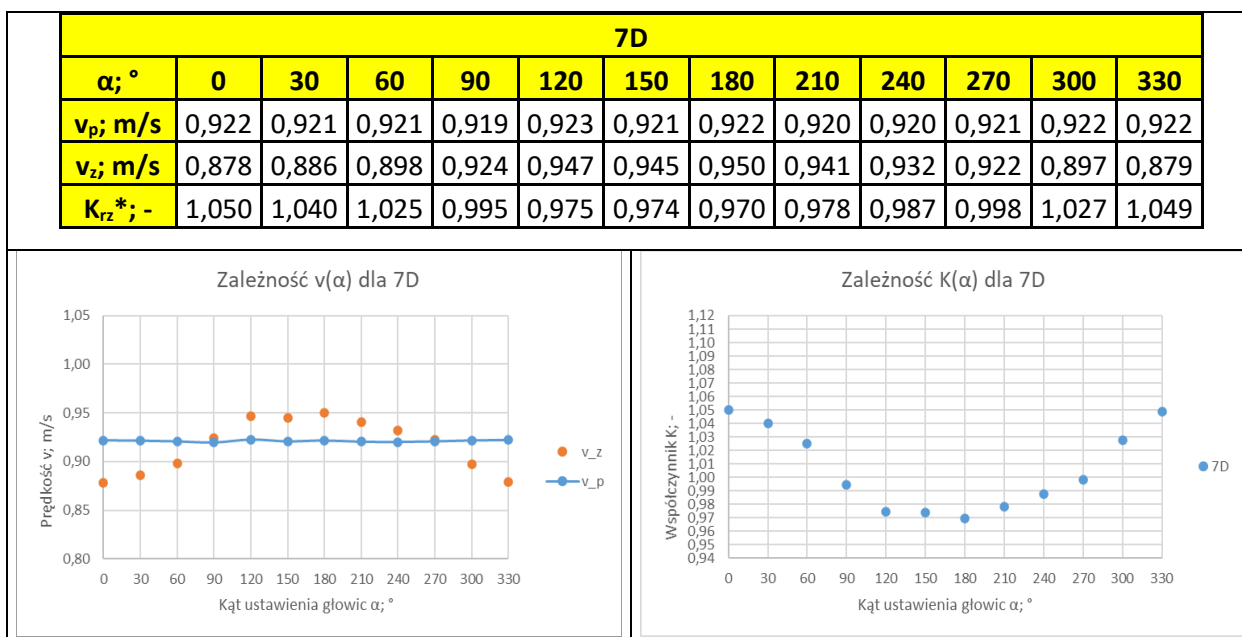


Tabela 6.6. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 8D.

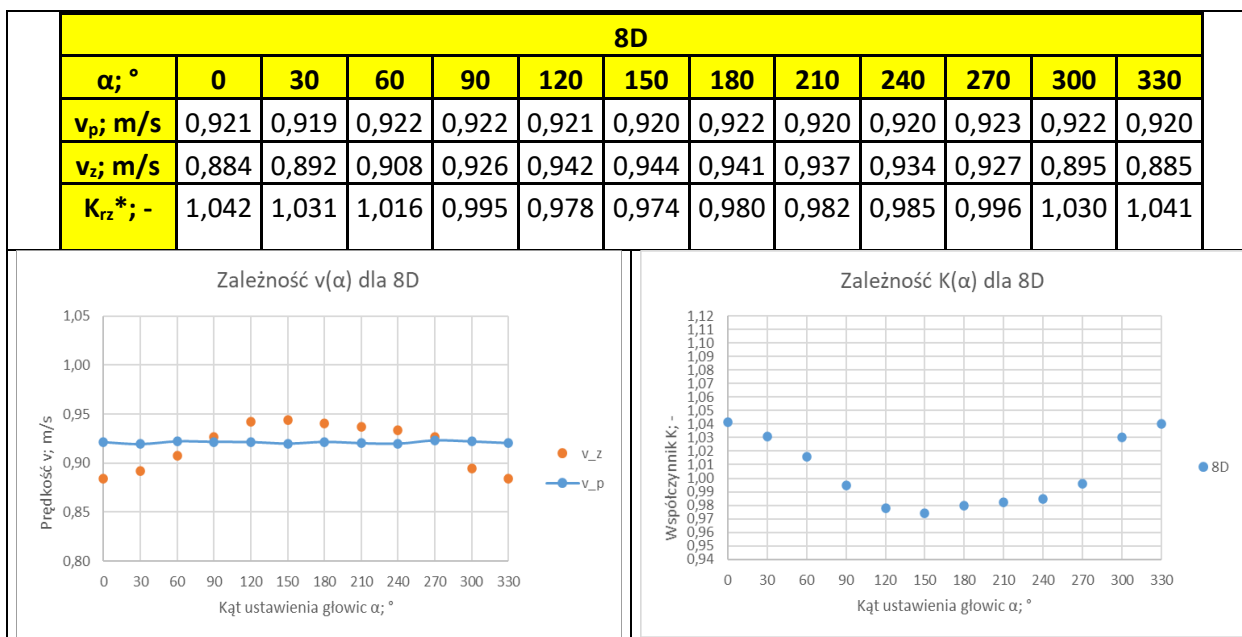


Tabela 6.7. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 9D.

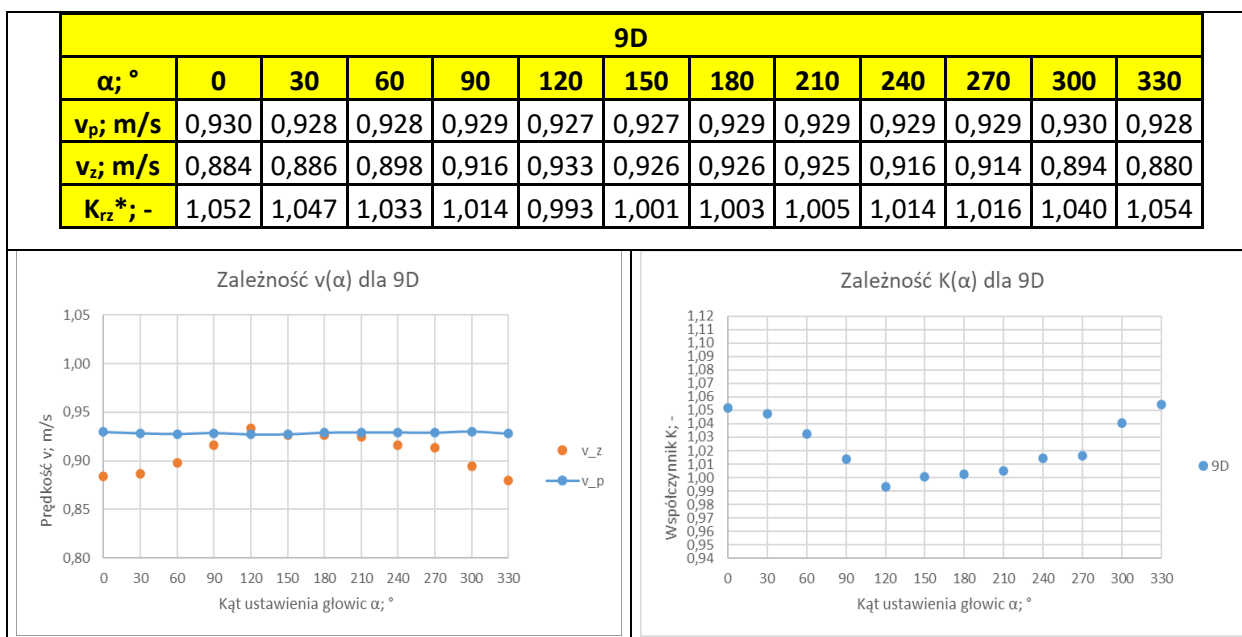


Tabela 6.8. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 10D.

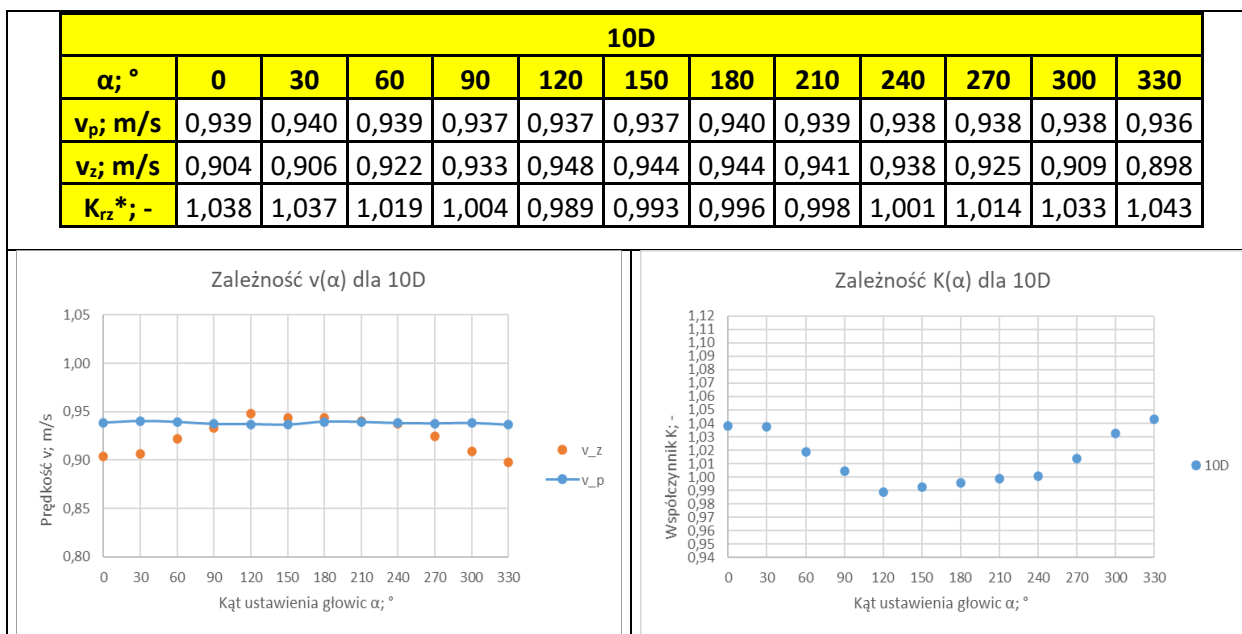


Tabela 6.9. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 12D.

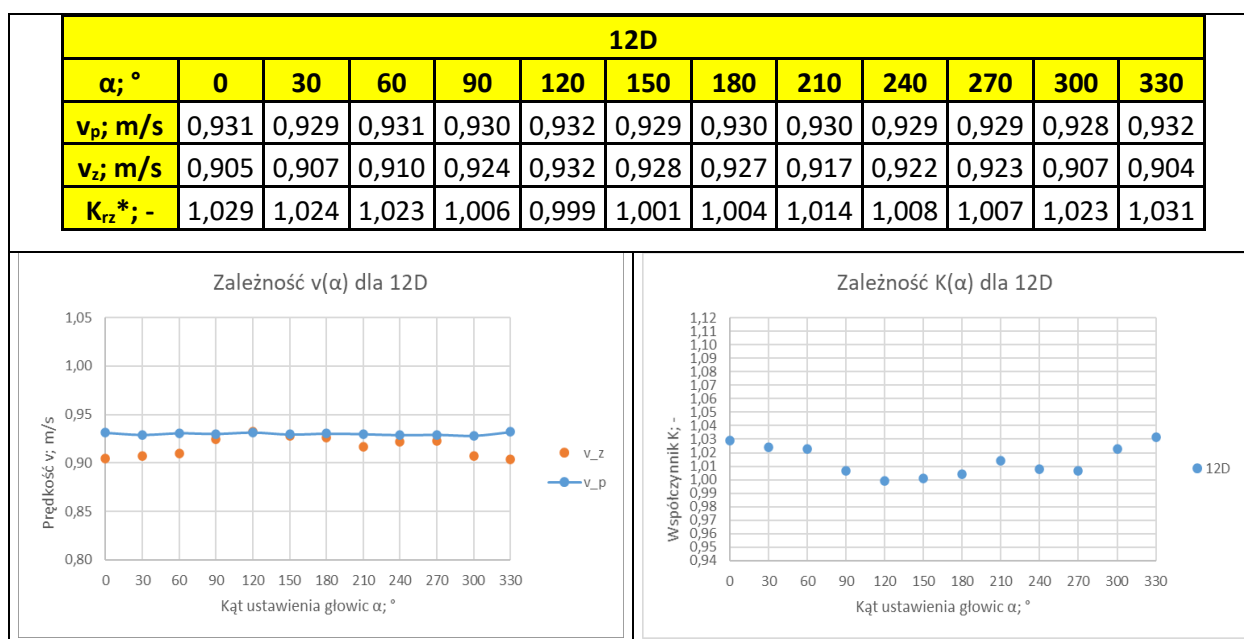
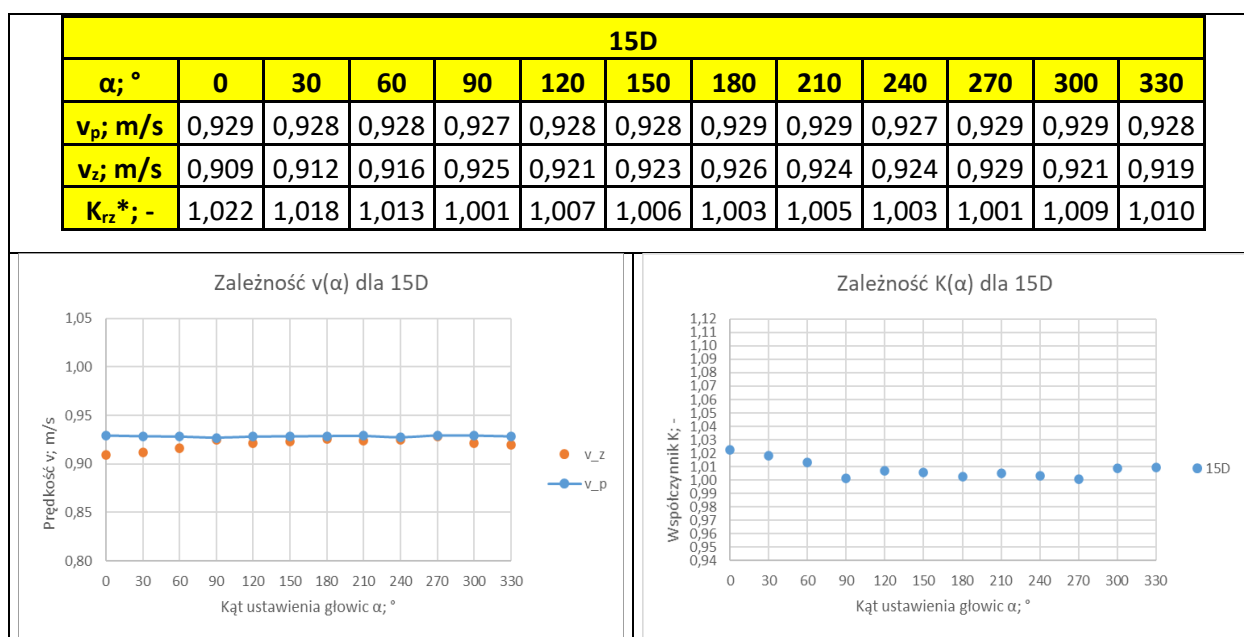


Tabela 6.10. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 15D.

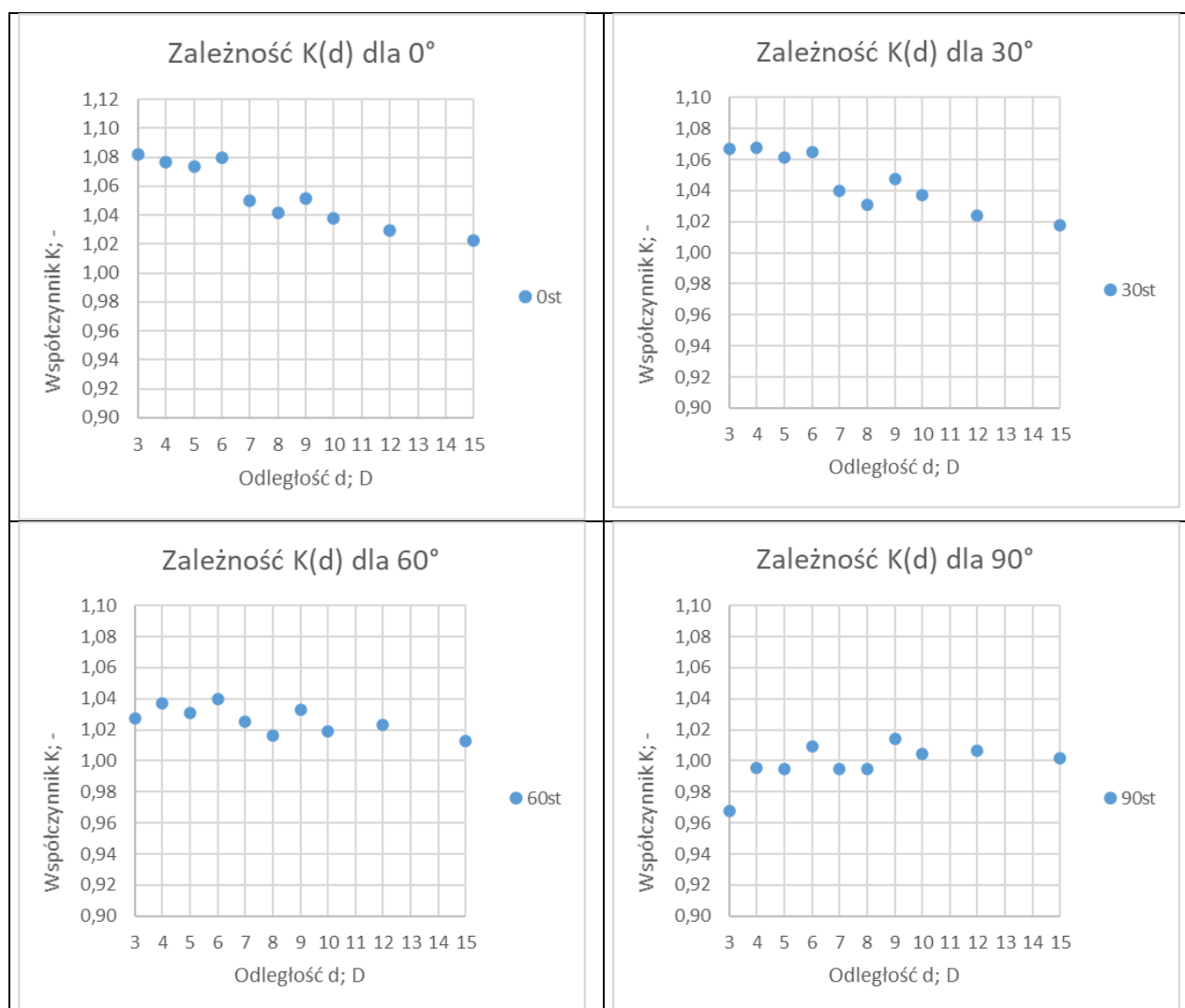


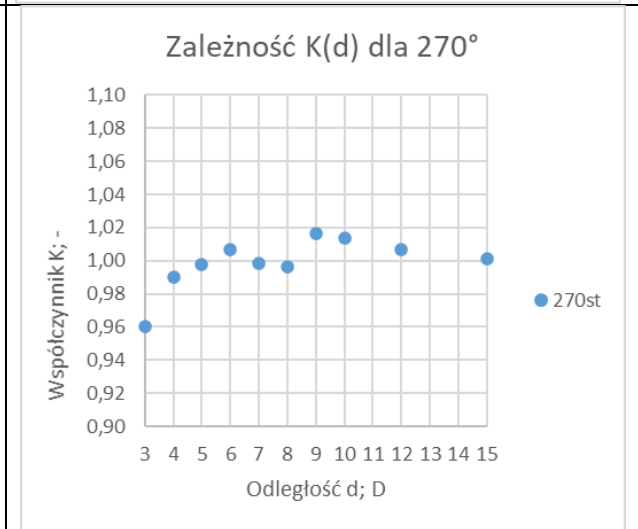
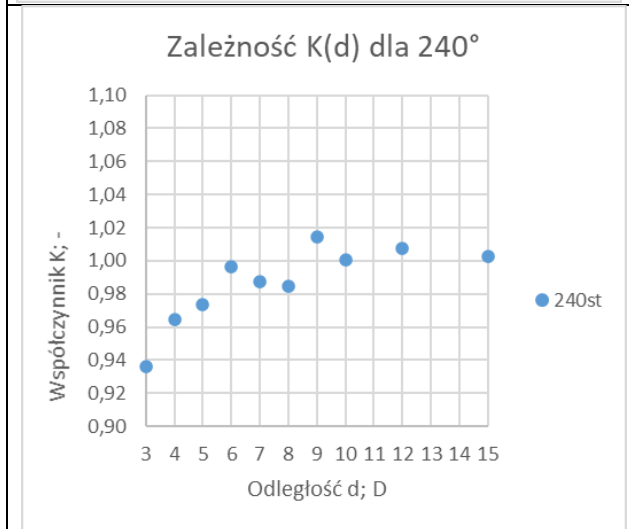
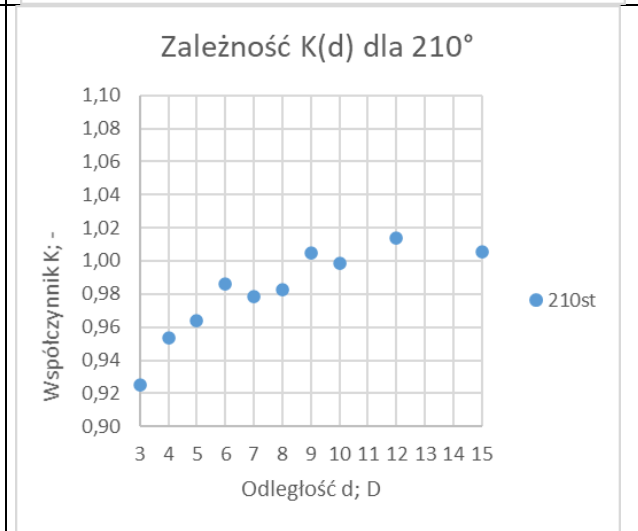
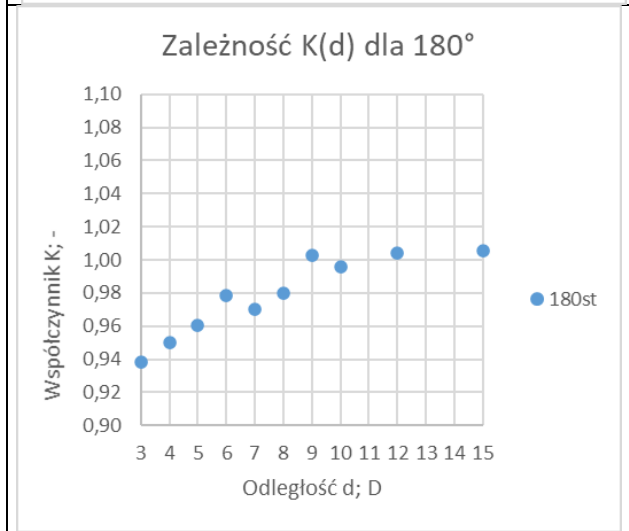
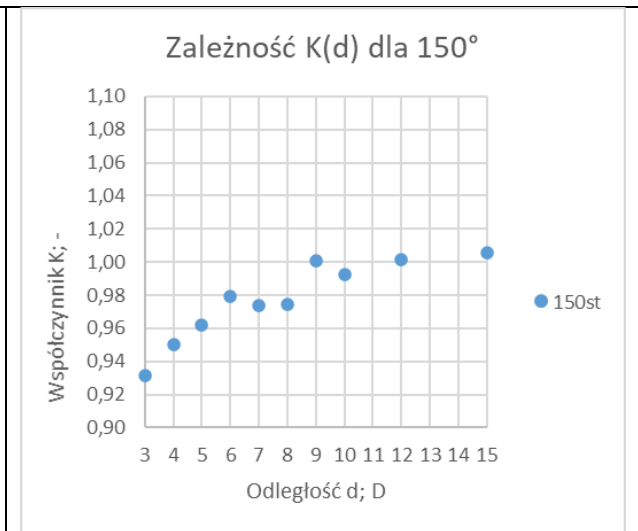
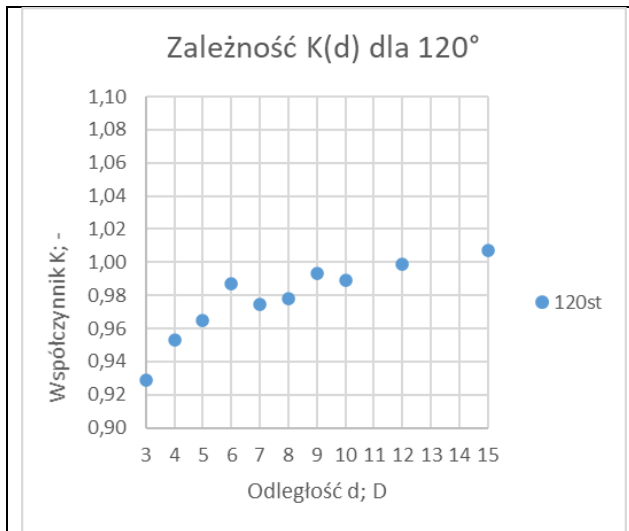
Wraz ze wzrostem odległości przekroju pomiarowego od zasowy zmniejsza się rozrzut wartości  $K_{rz}^*$  w zależności od kąta  $\alpha$ . W przypadku pomiaru wykonanego w pierwszym przekroju pomiarowym, w odległości 3D od zasowy nożowej zbiór wartości  $K_{rz}^*$  stanowił zakres (0,925 , 1,110). W każdym kolejnym przekroju pomiarowym dysproporcja pomiędzy wartością minimalną i maksymalną  $K_{rz}^*$  zmniejszała się stopniowo. Dla przekroju 5D zbiór wartości stanowił zakres (0,961 , 1,073), a dla przekroju 10D (0,989 , 1,043). We wszystkich przekrojach 3D - 10D występują ten sam charakterystyczny przebieg zależności  $K_{rz}^*(\alpha)$ . Największe wartości  $K_{rz}^*$  występują dla skrajnych wartości kąta  $\alpha = 0^\circ$  i  $330^\circ$ . Przebieg zależności  $K_{rz}^*(\alpha)$  można dla przekrojów 3D - 10D opisać w przybliżeniu funkcją kwadratową, bądź w niektórych przypadkach wielomianem 3 stopnia.

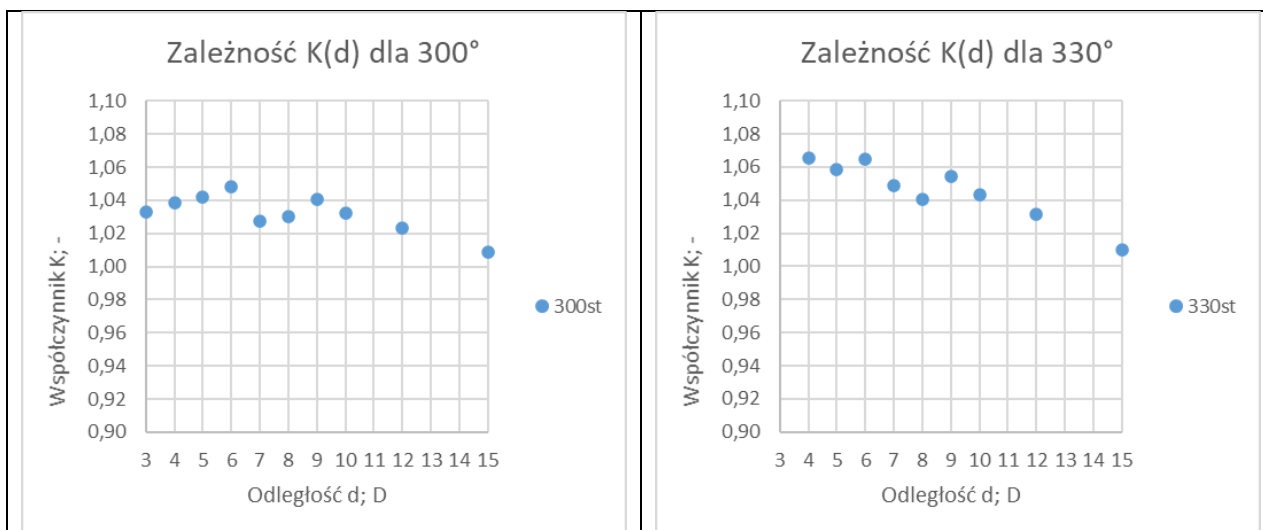
W przekrojach 12D i 15D obserwujemy wyraźną zmianę charakteru zależności i wyrównanie się prędkości  $v_p$  i  $v_z$ , co objawia się w zbliżaniu się wartości współczynnika  $K_{rz}^*$  do wartości  $K_{rz}^* = 1 \pm$  błąd pomiarowy przepływomierza. Dla przekroju 12D zbiór wartości  $K_{rz}^*$  stanowił zakres (1,001 , 1,031), a dla przekroju 15D (1,001 , 1,022). Dysproporcja pomiędzy pomiarami wykonanymi w różnych kątach  $\alpha$  ustawienia głowic przepływomierza nie jest znacząca, a różnice pomiędzy pomiarami mieszczą się w zakresie błędu pomiaru użytego przepływomierza.

Opisany trend przebiegu zależności  $K_{rz}^*(\alpha)$  potwierdzają zamieszczone poniżej wykresy zależności wartości  $K_{rz}^*$  od odległości przekroju pomiarowego dla poszczególnych kątów. Dla wszystkich kątów  $\alpha$  widoczne jest wyraźne wyrównanie się prędkości  $v_p$  i  $v_z$ . Największa różnica między maksymalną i minimalną wartością  $K_{rz}^*$  występuje dla wspomnianych wcześniej kątów  $\alpha = 0^\circ$  i  $330^\circ$ . Natomiast najmniejsze różnice widoczne są na wykresach  $K^*(d)$  dla kątów  $\alpha = 60^\circ$  dla którego wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w zakresie (1,01 , 1,04),  $\alpha = 90^\circ$  dla którego wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w zakresie (0,965 , 1,015),  $\alpha = 270^\circ$  dla którego wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w zakresie (0,96 , 1,02) oraz  $\alpha=300^\circ$  dla którego wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w zakresie (1,01 , 1,05).

Tabela 6.11. Graficzna prezentacja zależności  $K^*(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla 1/3 wysokości zamknięcia zasuw nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu Z przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$ .







### 6.1.2 Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 35\ 000$ i układzie głowic V

Poniżej w rozdziale 6.1.2 zamieszczono wyniki pomiarów i obliczeń dla serii pomiarowej wykonanej przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw nożowej, przy liczbie Reynoldsa przepływu  $Re \approx 35\ 000$  i ustawieniu głowic przepływomierza ultradźwiękowego typu V. W tabelach 6.12-6.22 zostały umieszczone wykresy stworzone na podstawie danych pomiarowych oraz rezultatów obliczeń.

Tabela 6.12. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 3D.

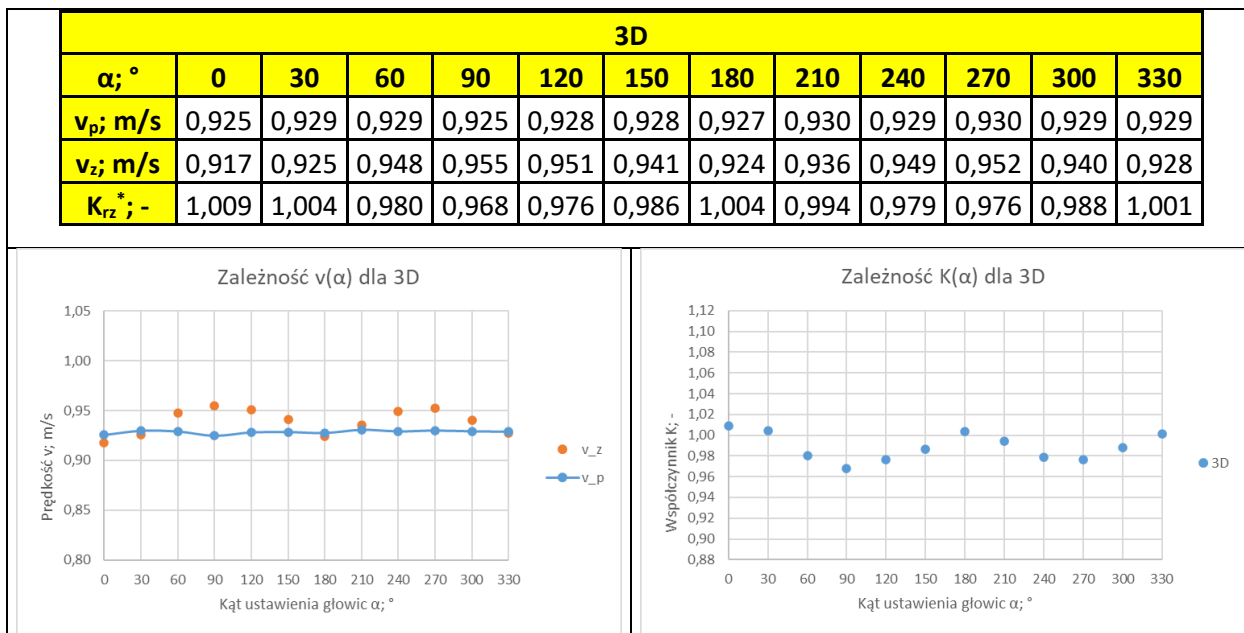




Tabela 6.13. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 4D.

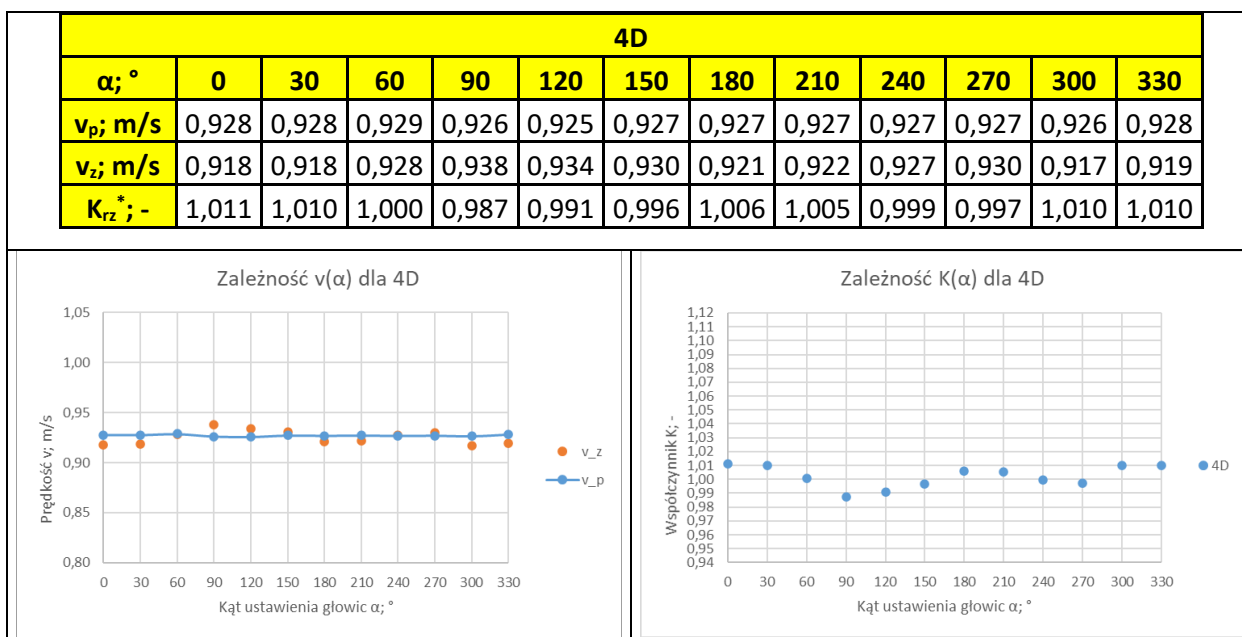


Tabela 6.14. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 5D.

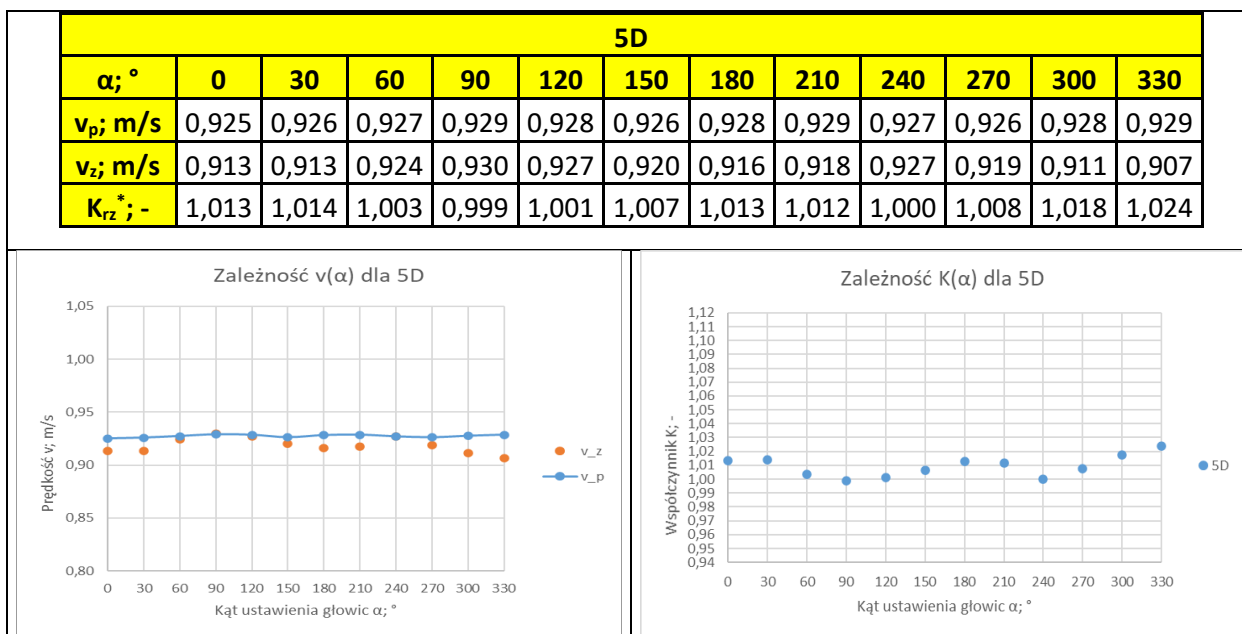


Tabela 6.15. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 6D.

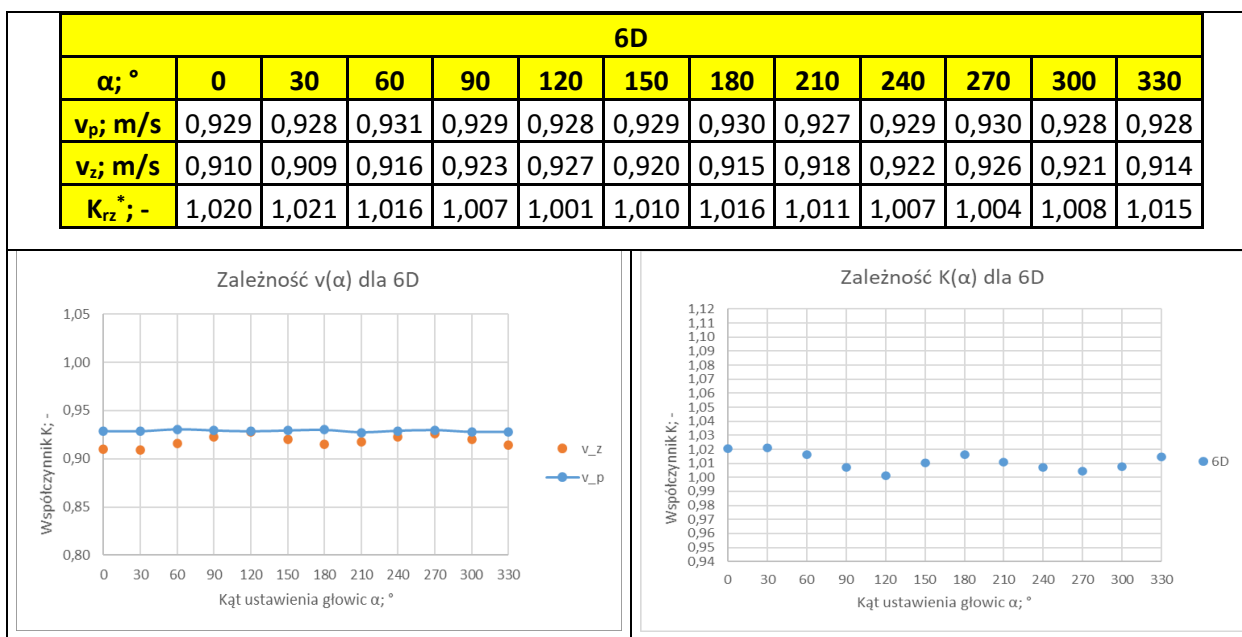


Tabela 6.16. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 7D.

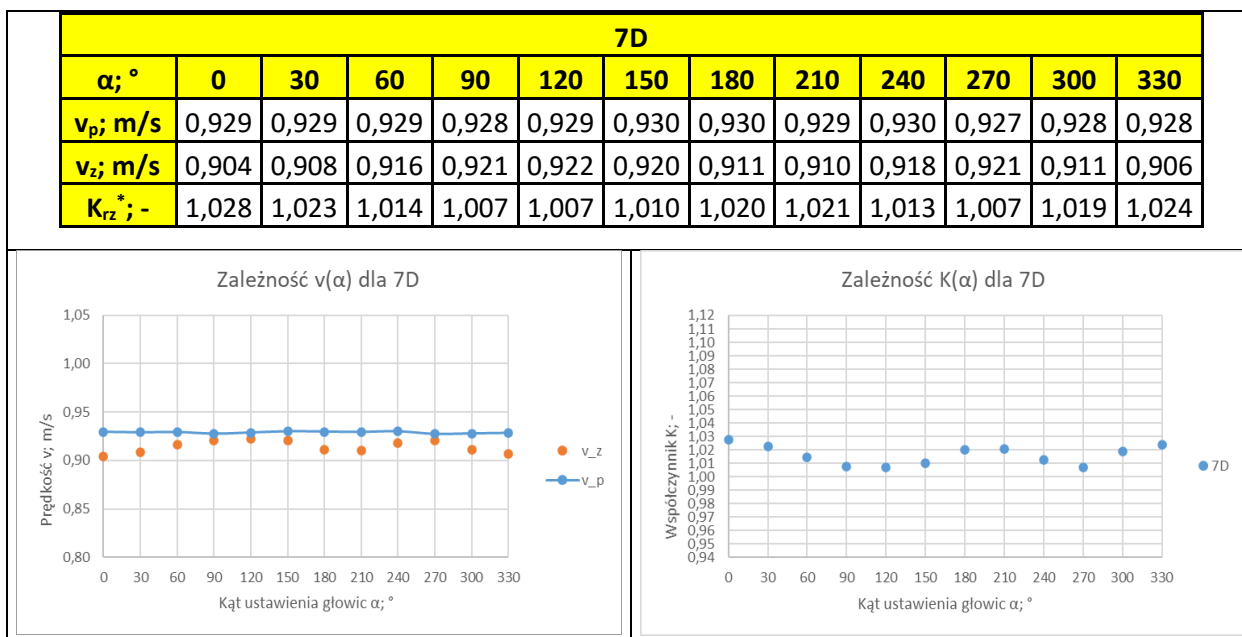


Tabela 6.17. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 8D.

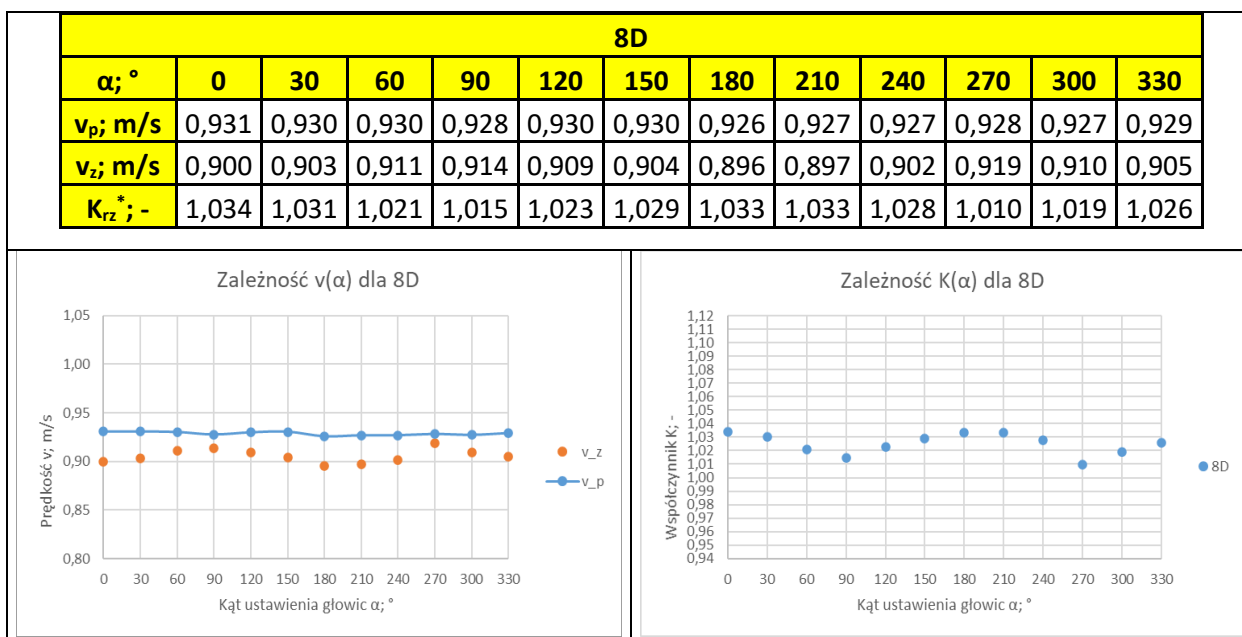


Tabela 6.18. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 9D.

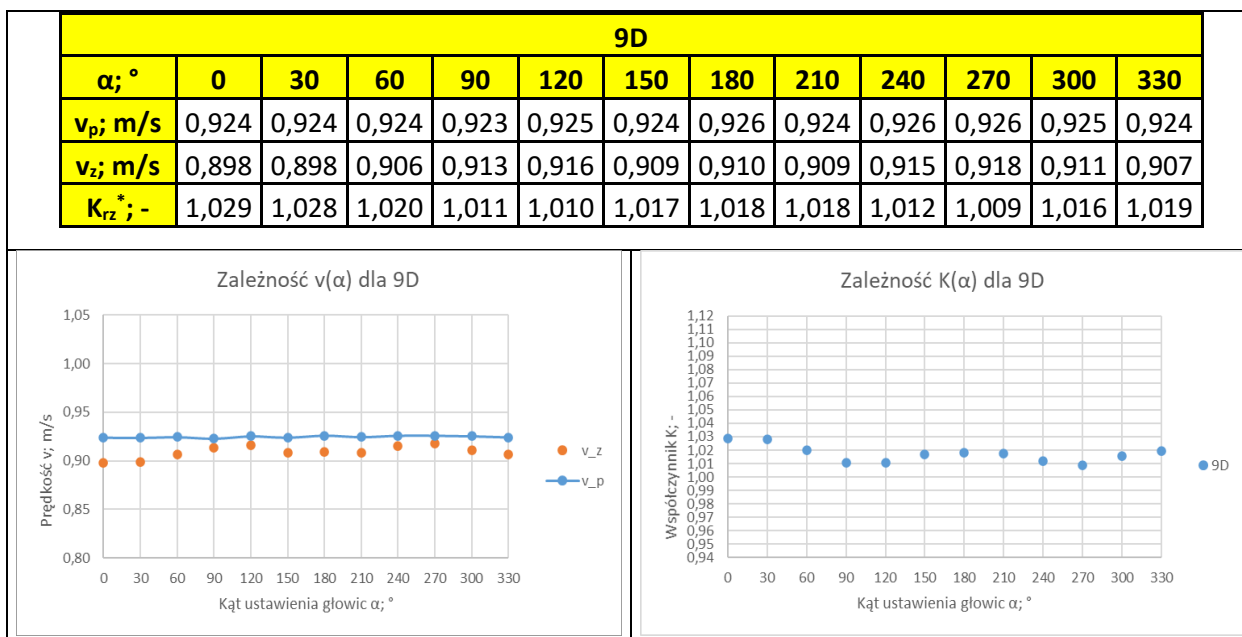


Tabela 6.19. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 10D.

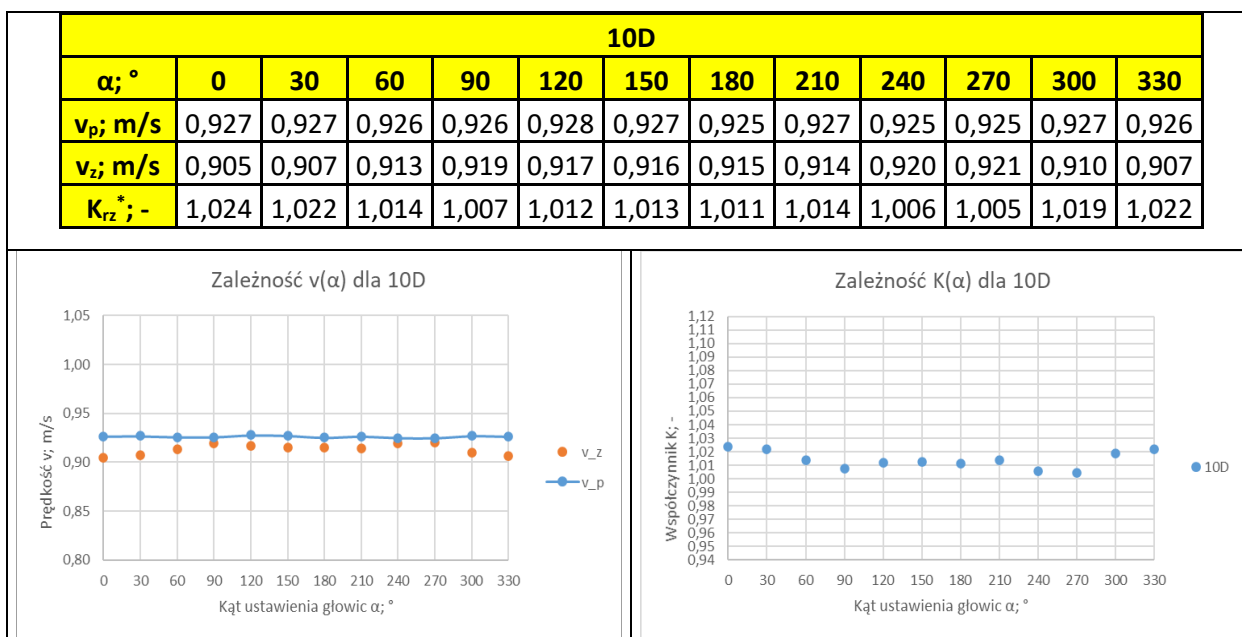


Tabela 6.20. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 12D.

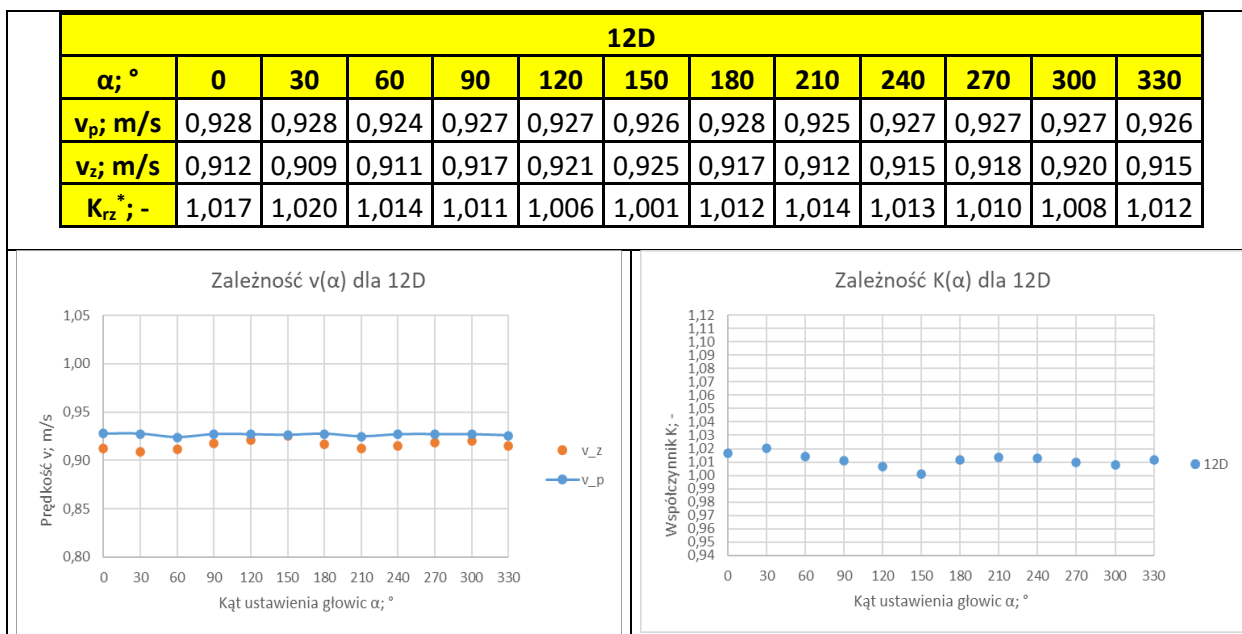
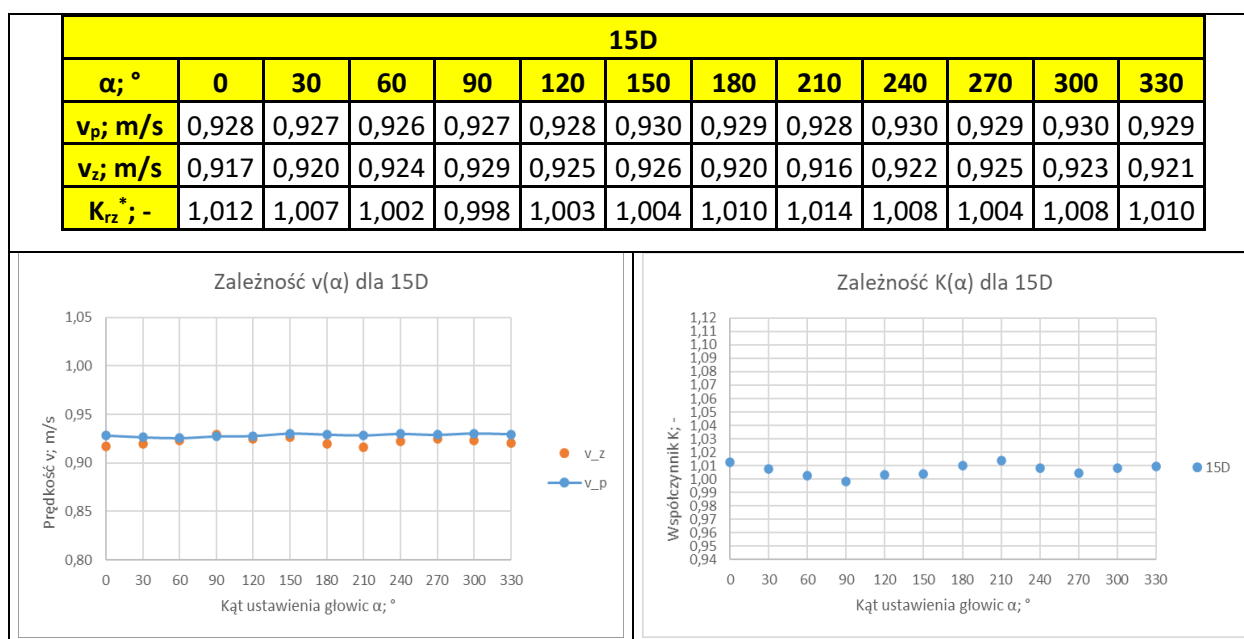


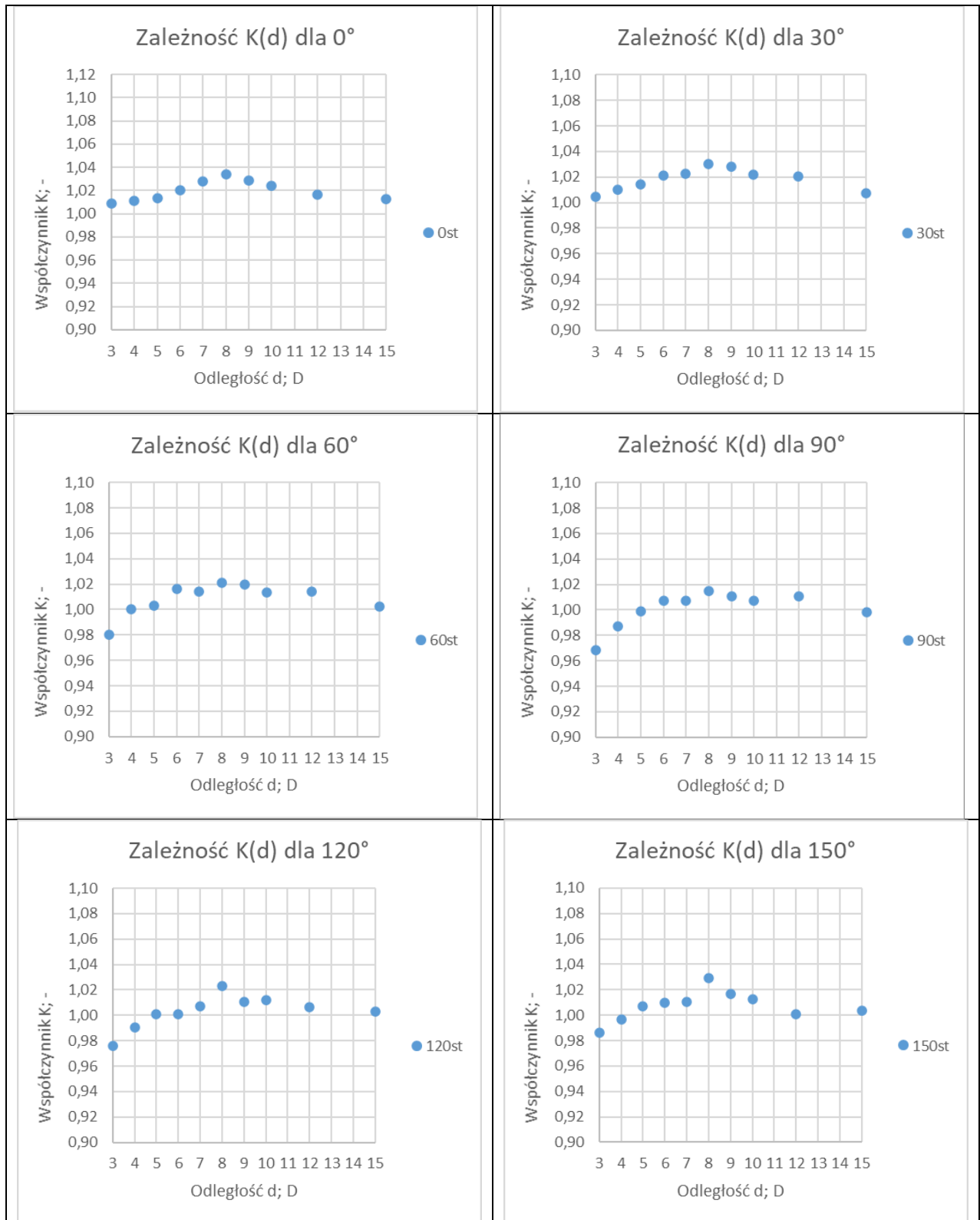
Tabela 6.21. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 15D.

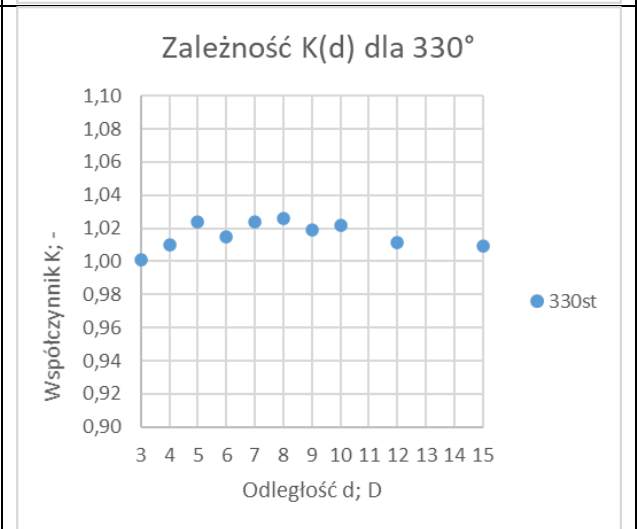
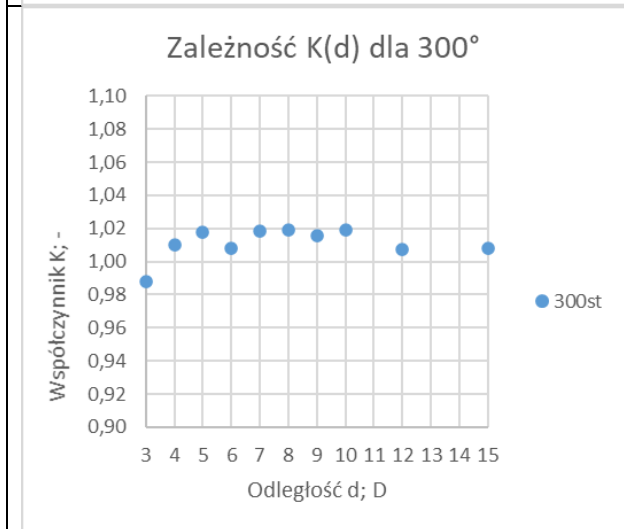
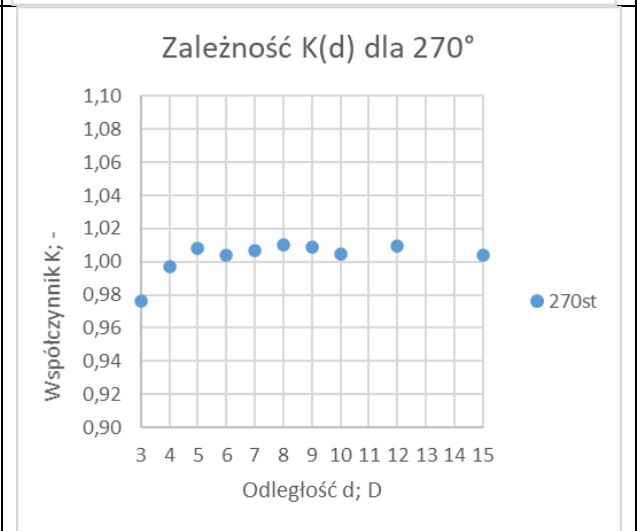
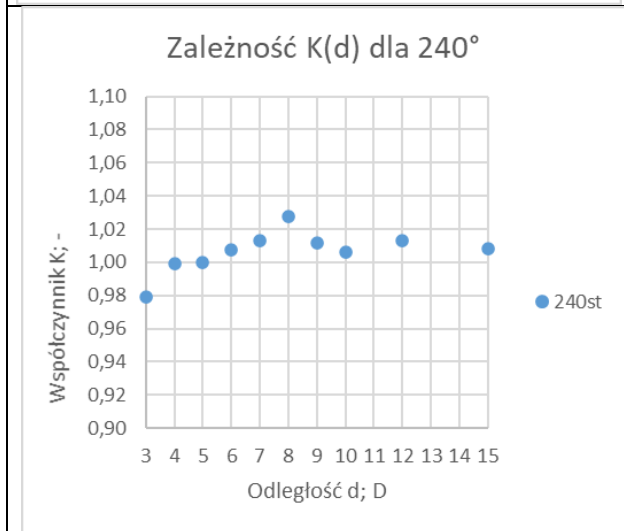
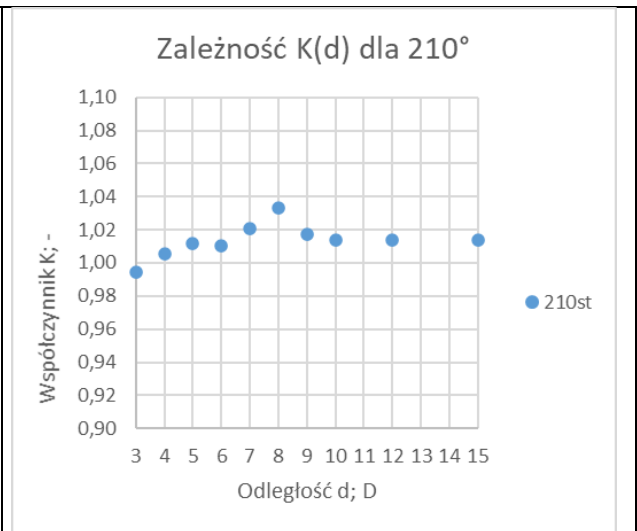
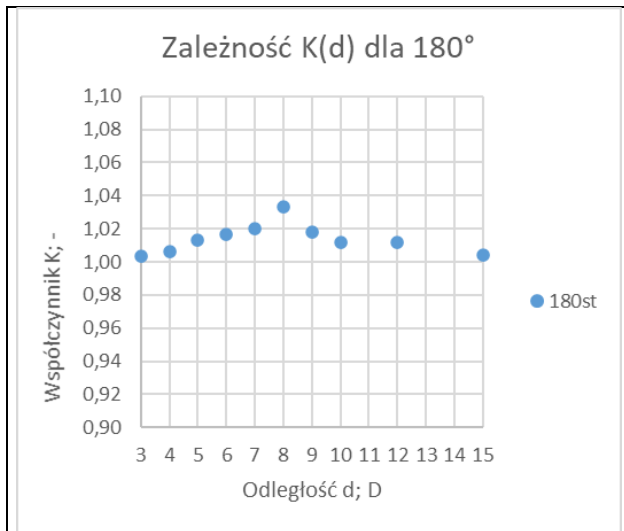


W przebiegu zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla ustawienia głowic ultradźwiękowych typu V widzimy zasadnicze różnice w porównaniu z przebiegiem zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla ustawienia głowic typu Z. W układzie typu V, z podwójnym przejściem fali ultradźwiękowej, różnice pomiędzy minimalną i maksymalną wartością  $K_{rz}^*(\alpha)$  dla poszczególnych kątów  $\alpha$  są wyraźnie mniejsze. Wraz ze zwiększeniem odległości przekroju pomiarowego od zasowy przebieg zależności ulega nieznacznemu spłaszczeniu. Rozrzut wartości w zależności od kąta  $\alpha$  jest znacznie mniejszy niż w przypadku pomiarów wykonanych w ustawieniu głowic typu Z. W przypadku pomiaru wykonanego przekroju pomiarowym 3D zbiór wartości  $K_{rz}^*$  stanowił zakres (0,968 , 1,0090, dla przekroju 5D zbiór wartości stanowił zakres (0,999 , 1,024), dla przekroju 10D (1,005 , 1,024), a dla przekroju 15D (0,998 , 1,014). Widoczne jest więc, że pomiary prędkości wykonywane przy użyciu przepływomierza ultradźwiękowego w układzie głowic typu V są znacznie mniej zależne od wpływu zaburzeń przepływu niż pomiary wykonywane dla układu głowic typu Z i wybór kąta  $\alpha$  ustawienia głowic w układzie typu V ma znacznie mniejsze znaczenie niż w układzie typu Z.

Opisany powyżej przebieg zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  potwierdzają zamieszczone poniżej wykresy zależności wartości  $K_{rz}^*$  od odległości przekroju pomiarowego dla poszczególnych kątów. Dla wszystkich kątów  $\alpha$  widoczne jest wyrównanie się prędkości  $v_p$  i  $v_z$  wraz ze wzrostem odległości przekroju pomiarowego od zasowy, co objawia się w zbliżaniu się wartości współczynnika  $K_{rz}^*$  do wartości  $= 1 \pm$  błąd pomiarowy przepływomierza. Co warto zauważyć dla wszystkich kątów  $\alpha$  w przekroju pomiarowym 3D znajdującym się najbliżej zasowy wartość  $K_{rz}^*$  mieści się w zakresie  $1 \pm$  błąd pomiarowy przepływomierza. Następnie zauważalny jest wzrost wartości  $K_{rz}^*$  w miarę zwiększania odległości przekroju pomiarowego od zasowy, po czym osiągając maksimum w przekroju 8D wartość  $K_{rz}^*$  zaczyna stabilizować się na poziomie  $K_{rz}^* = 1 \pm$  błąd pomiarowy przepływomierza.

Tabela 6.22. Graficzna prezentacja zależności  $K^*_{rz}(a,d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla  $1/3$  wysokości zamknięcia zasuw nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu V przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$ .



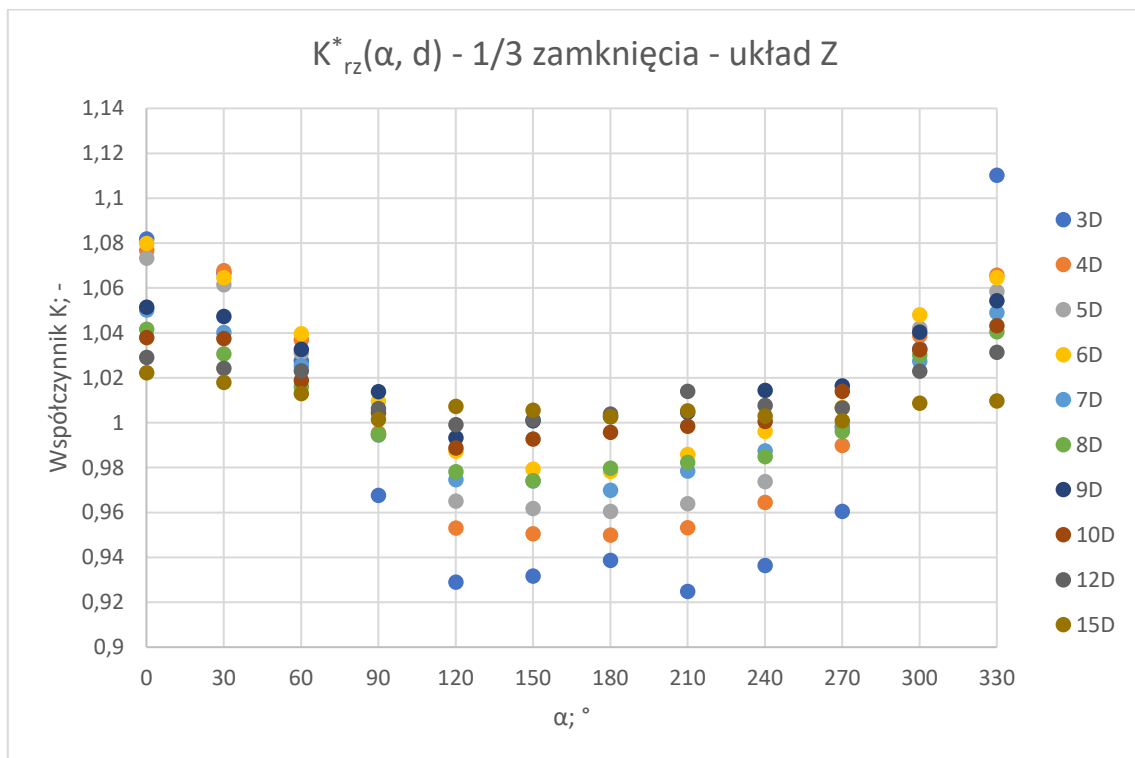


### 6.1.3 Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 35\ 000$ – podsumowanie

W rozdziale 6.1.3 zamieszone zostały zbiorcze wyniki pomiarów wykonanych przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw nożowej, przy liczbie Reynoldsa przepływu  $Re \approx 35\ 000$  dla ustawień głowic ultradźwiękowych typu Z i typu V. Stworzone wykresy zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  rys. 6.1 i rys. 6.2 pozwalają na porównanie rezultatów badań dla obu ustawień głowic ultradźwiękowych.

Tabela 6.23, Zbiorcze zestawienie zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla 1/3 wysokości zamknięcia zasuw nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu Z przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$ .

Re $\approx$ 35 000 - układ Z												
$\alpha; ^\circ$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
3D	1,082	1,067	1,028	0,968	0,929	0,932	0,939	0,925	0,936	0,906	1,033	1,110
4D	1,077	1,068	1,037	0,995	0,953	0,950	0,950	0,953	0,964	0,990	1,039	1,066
5D	1,073	1,061	1,031	0,994	0,965	0,962	0,961	0,964	0,974	0,998	1,042	1,058
6D	1,080	1,065	1,040	1,010	0,987	0,979	0,978	0,986	0,996	1,007	1,048	1,065
7D	1,050	1,040	1,025	0,995	0,975	0,974	0,97	0,978	0,987	0,998	1,027	1,049
8D	1,042	1,031	1,016	0,995	0,978	0,974	0,98	0,982	0,985	0,996	1,030	1,041
9D	1,052	1,047	1,033	1,014	0,993	1,001	1,003	1,005	1,014	1,016	1,040	1,054
10D	1,038	1,037	1,019	1,004	0,989	0,993	0,996	0,998	1,001	1,014	1,033	1,043
12D	1,029	1,024	1,023	1,006	0,999	1,001	1,004	1,014	1,008	1,007	1,023	1,031
15D	1,022	1,018	1,013	1,001	1,007	1,006	1,003	1,005	1,003	1,001	1,009	1,010

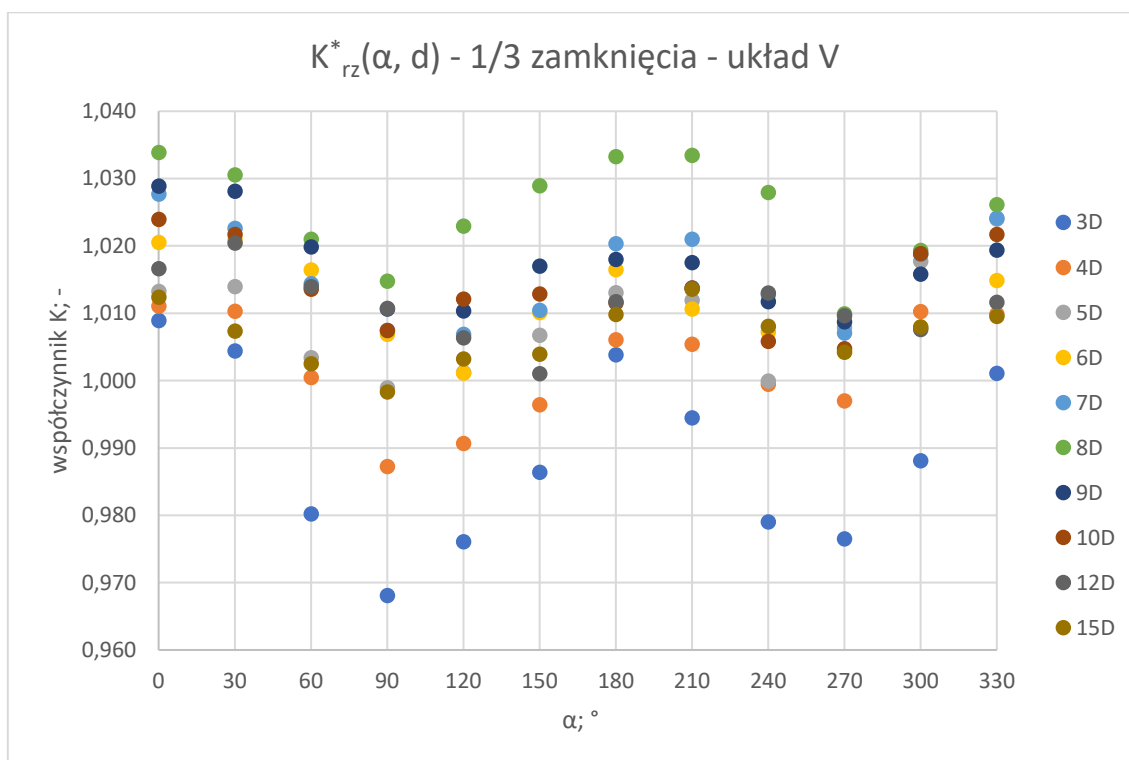


Rys. 6.1. Wykres zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla 1/3 wysokości zamknięcia zasuw nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu Z przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$ .



Tabela 6.24. Zbiornicze zestawienie zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla  $1/3$  wysokości zamknięcia zasuw nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu V przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$ .

Re $\approx$ 35 000 - układ V												
$\alpha; ^\circ$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
3D	1,009	1,004	0,980	0,968	0,976	0,986	1,004	0,994	0,979	0,976	0,988	1,001
4D	1,011	1,010	1,000	0,987	0,991	0,996	1,006	1,005	0,999	0,997	1,010	1,010
5D	1,013	1,014	1,003	0,999	1,001	1,007	1,013	1,012	1,000	1,008	1,018	1,024
6D	1,020	1,021	1,016	1,007	1,001	1,010	1,016	1,011	1,007	1,004	1,008	1,015
7D	1,028	1,023	1,014	1,007	1,007	1,010	1,020	1,021	1,013	1,007	1,019	1,024
8D	1,034	1,031	1,021	1,015	1,023	1,029	1,033	1,033	1,028	1,010	1,019	1,026
9D	1,029	1,028	1,020	1,011	1,010	1,017	1,018	1,018	1,012	1,009	1,016	1,019
10D	1,024	1,022	1,014	1,007	1,012	1,013	1,011	1,014	1,006	1,005	1,019	1,022
12D	1,017	1,020	1,014	1,011	1,006	1,001	1,012	1,014	1,013	1,010	1,008	1,012
15D	1,012	1,007	1,002	0,998	1,003	1,004	1,010	1,014	1,008	1,004	1,008	1,010



Rys. 6.2. Wykres zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla  $1/3$  wysokości zamknięcia zasuw nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu V przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$ .

#### 6.1.4 Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 70\,000$ i układzie głowic Z

Poniżej w rozdziale 6.1.4 zamieszczono wyniki pomiarów i obliczeń dla serii pomiarowej wykonanej przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw nożowej, przy liczbie Reynoldsa przepływu  $Re \approx 70\,000$  i ustawieniu głowic przepływomierza ultradźwiękowego typu Z. W tabelach 6.25-6.35 zostały umieszczone wykresy stworzone na podstawie danych pomiarowych oraz rezultatów obliczeń.

Tabela 6.25. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 3D.

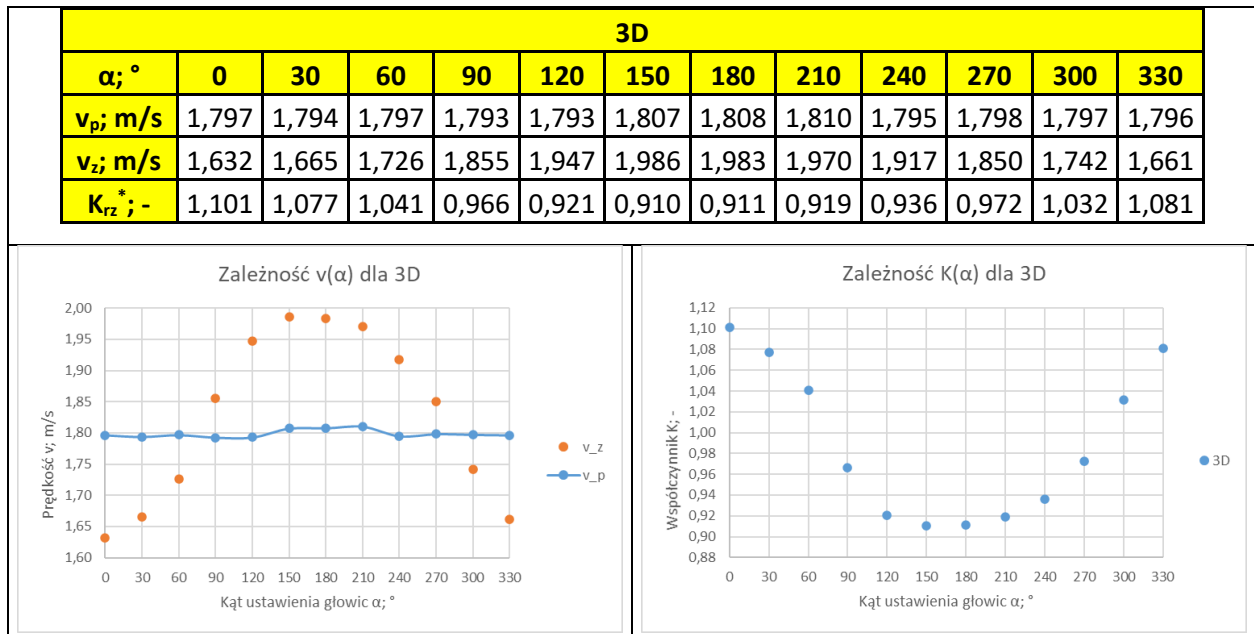


Tabela 6.26. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 4D.

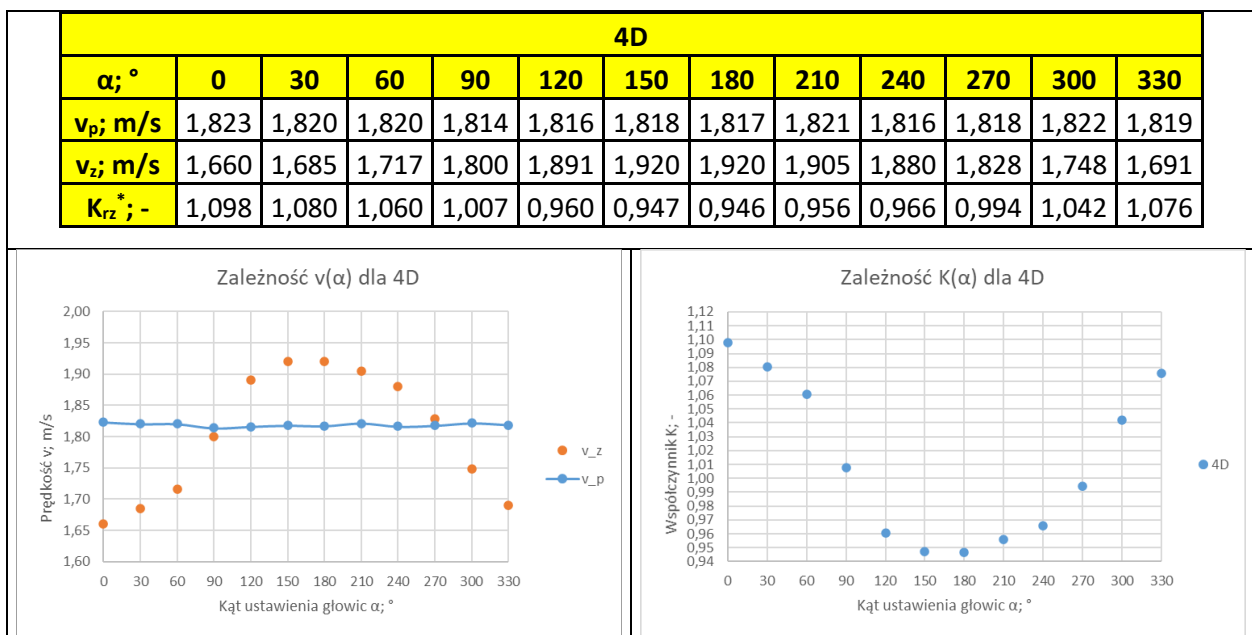


Tabela 6.27. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 5D.

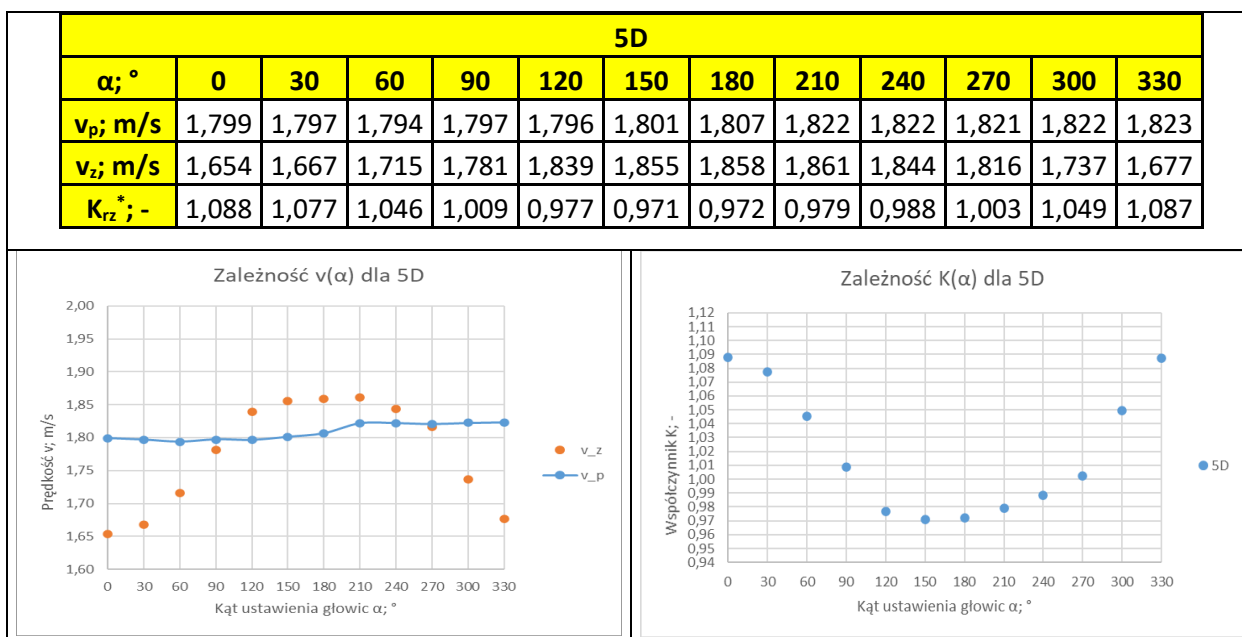


Tabela 6.28. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 6D.

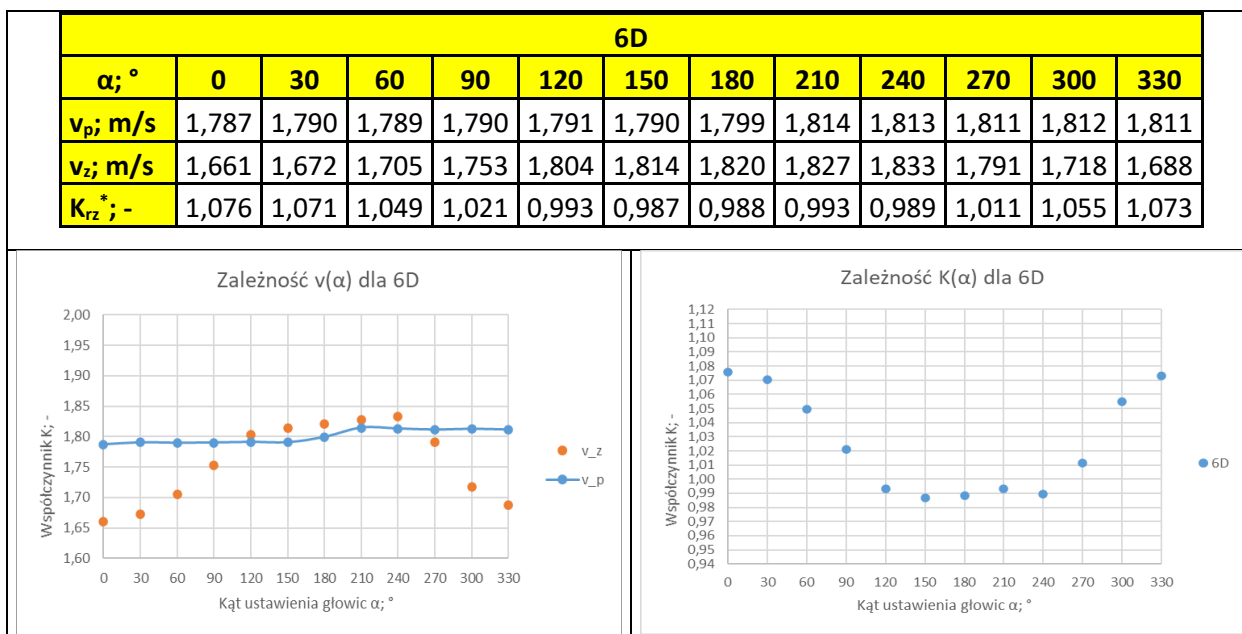


Tabela 6.29. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 7D..

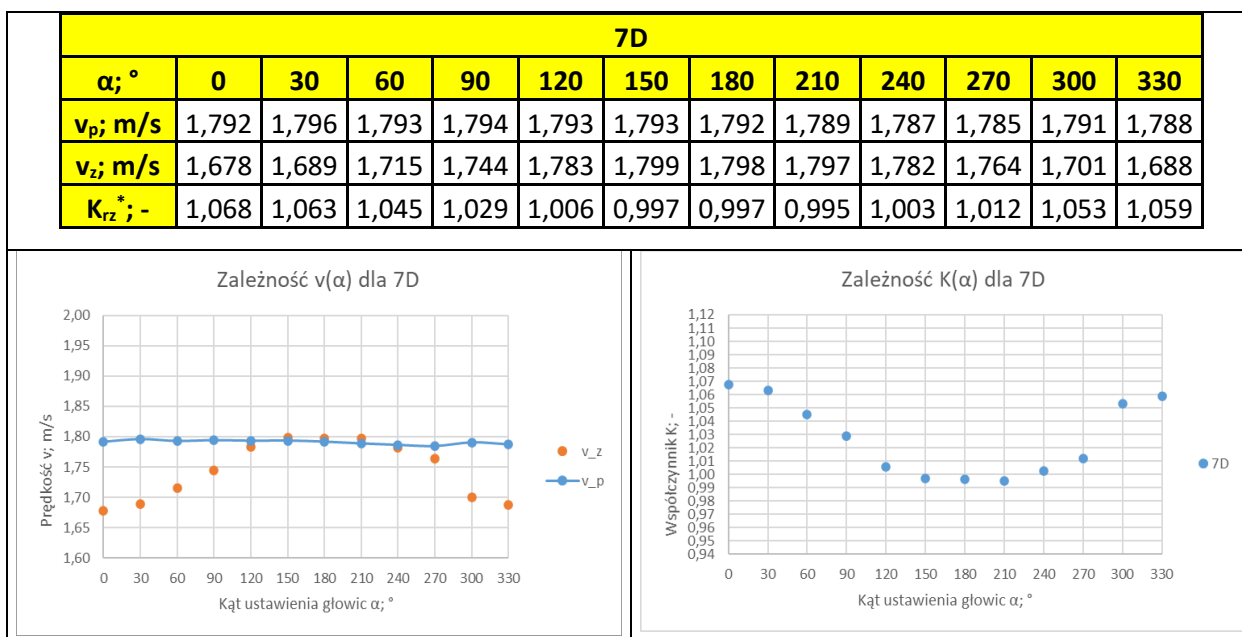


Tabela 6.30. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 8D.

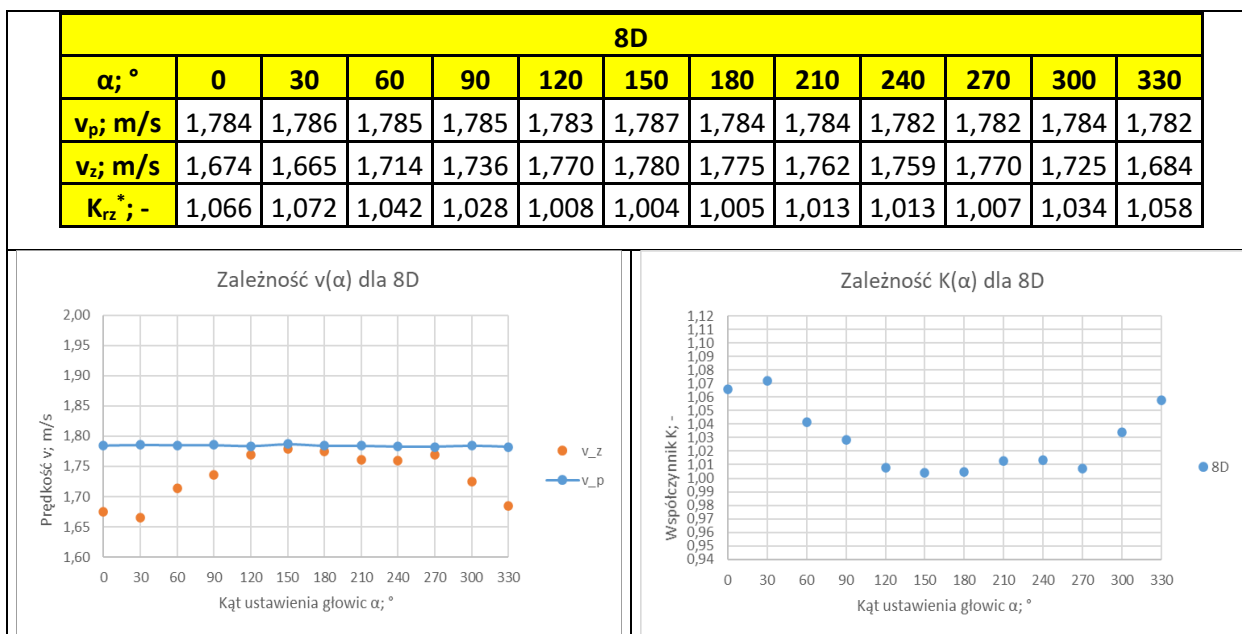


Tabela 6.31. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 9D.

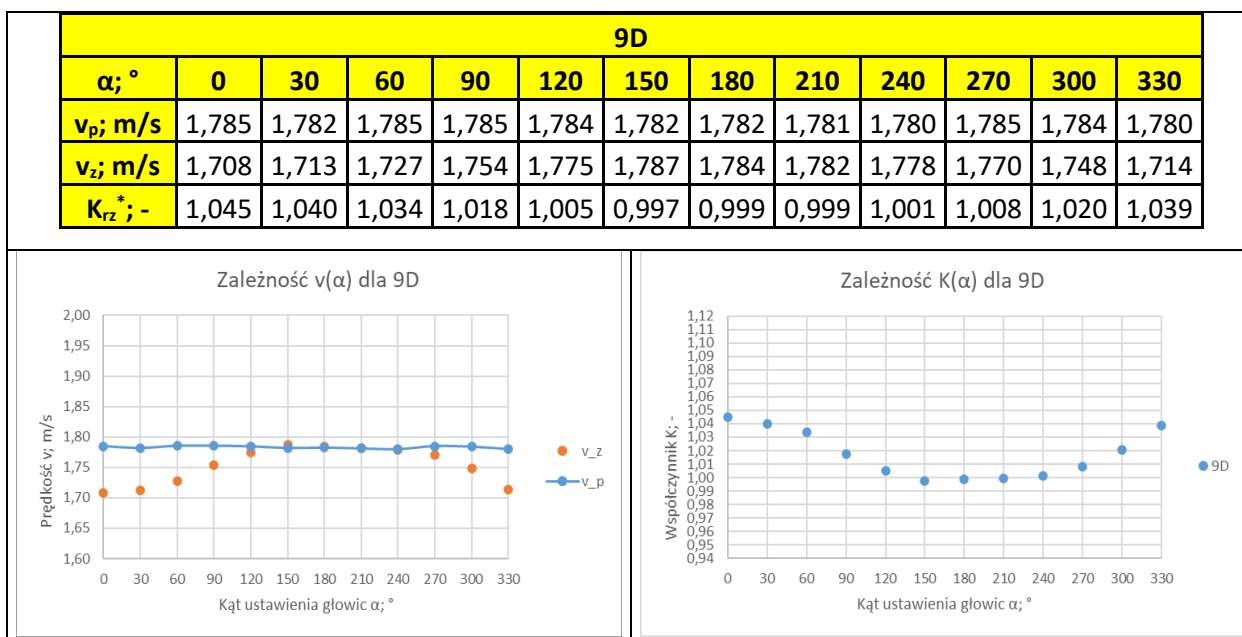


Tabela 6.32. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 10D.

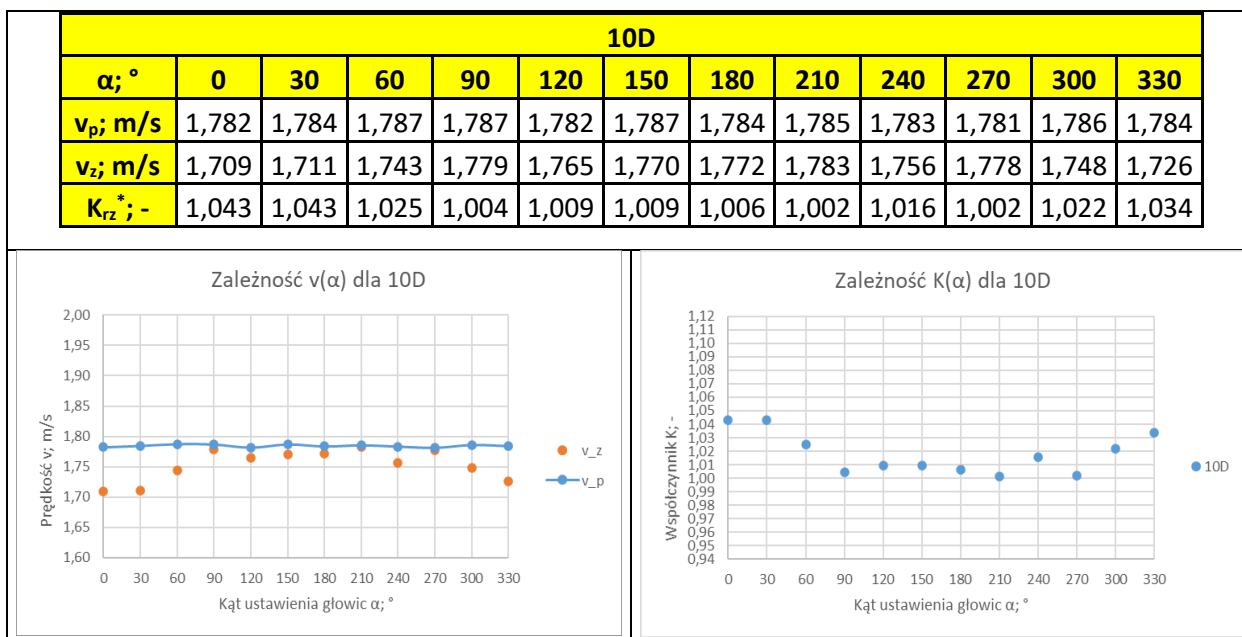
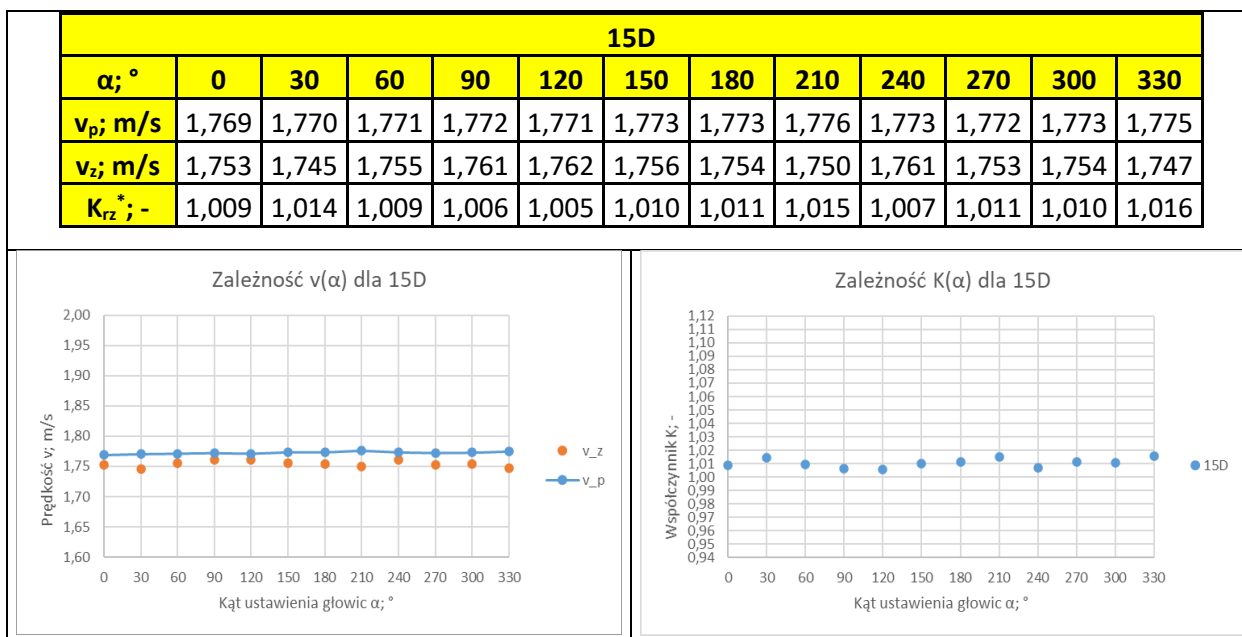


Tabela 6.33. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 12D.



Tabela 6.34. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 15D.



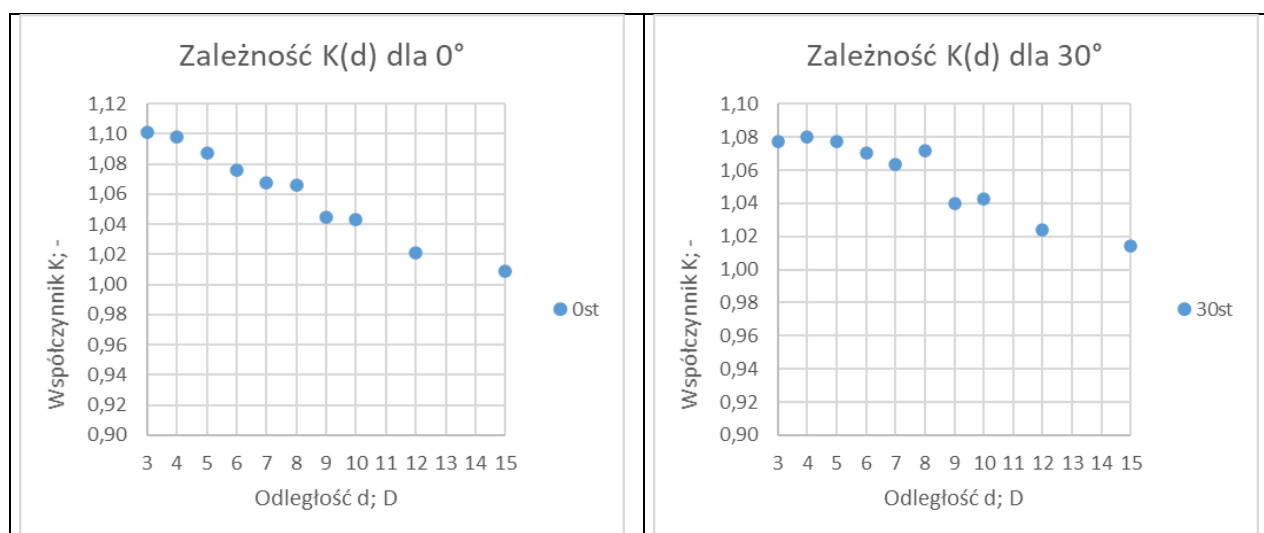
Analizując przebieg zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla serii pomiarowej wykonanej przy  $Re \approx 70\,000$  w ustawieniu głowic typu Z, widzimy wierną analogię do serii pomiarowej wykonanej przy  $Re \approx 35\,000$  także w ustawieniu głowic typu Z. Wraz ze wzrostem odległości przekroju pomiarowego od zasowy zmniejsza się rozrzut wartości  $K_{rz}^*$  w zależności od kąta  $\alpha$ . W przypadku pomiaru wykonanego w pierwszym przekroju pomiarowym, w odległości 3D od zasowy nożowej zbiór wartości  $K_{rz}^*$  stanowił zakres (0,91 , 1,10). W każdym kolejnym przekroju pomiarowym dysproporcja pomiędzy wartością minimalną i maksymalną  $K_{rz}^*$  zmniejszała się stopniowo. Dla przekroju 5D zbiór wartości stanowił zakres (0,971 , 1,088), a dla przekroju 10D (1,002 , 1,043). We wszystkich przekrojach 3D-10D występują ten sam charakterystyczny przebieg zależności  $K_{rz}^*(\alpha)$ . Największe wartości  $K_{rz}^*$  występują dla skrajnych wartości kąta  $\alpha=0^\circ$  i  $330^\circ$ . Przebieg zależności  $K_{rz}^*(\alpha)$  można dla przekrojów

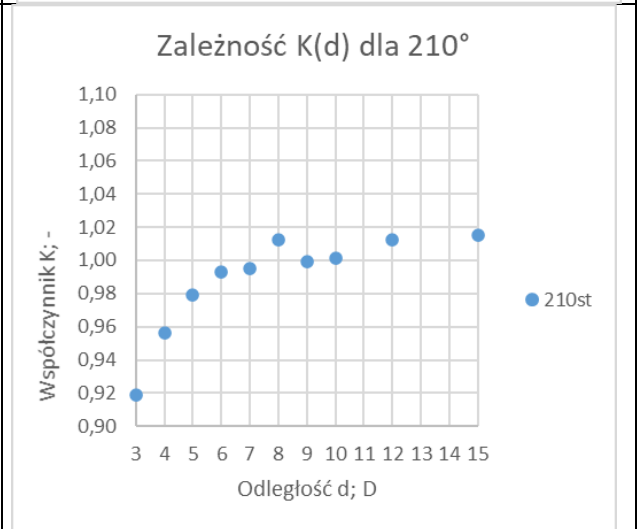
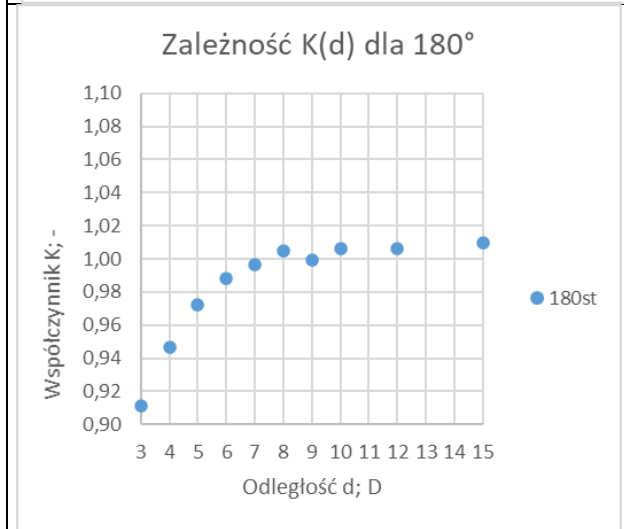
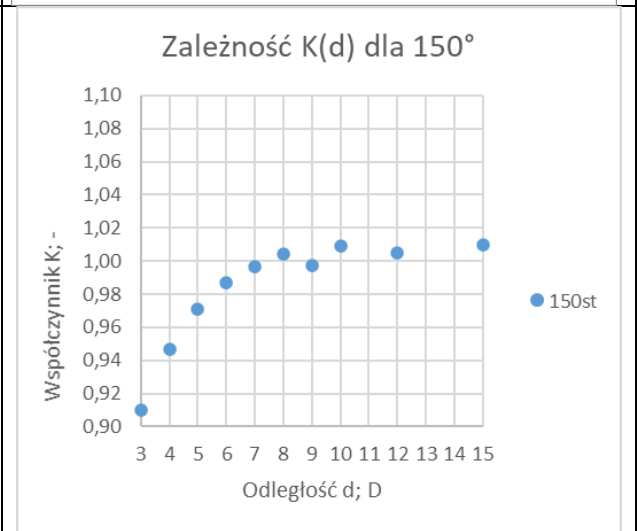
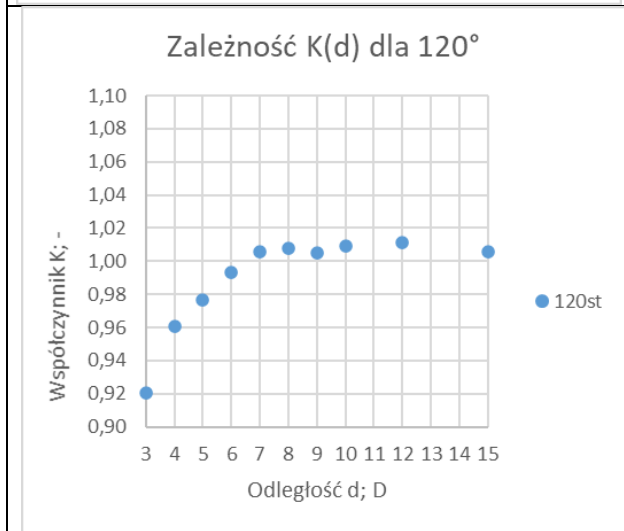
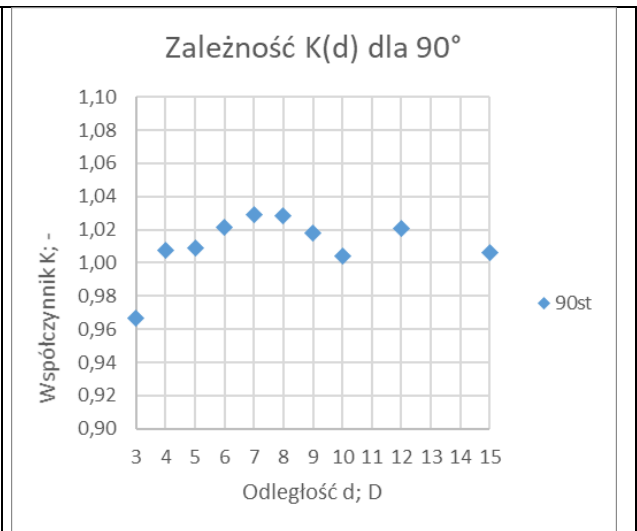
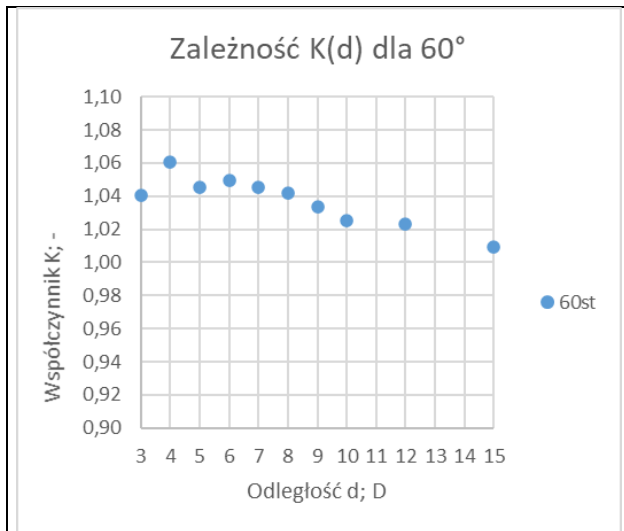
3D - 10D opisać w przybliżeniu funkcją kwadratową, bądź w niektórych przypadkach wielomianem 3 stopnia.

W przekrojach 12D i 15D obserwujemy wyraźną zmianę charakteru zależności i wyrównanie się prędkości  $v_p$  i  $v_z$ , co objawia się w zbliżaniu się wartości współczynnika  $K_{rz}^*$  do wartości  $K_{rz}^* = 1 \pm$  błąd pomiarowy przepływomierza. Dla przekroju 12D zbiór wartości  $K_{rz}^*$  stanowił zakres (1,001 , 1,031), a dla przekroju 15D (1,004 , 1,024). Dysproporcja pomiędzy pomiarami wykonanymi w różnych kątach  $\alpha$  ustawienia głowic przepływomierza nie jest znacząca, a różnice pomiędzy pomiarami mieszczą się w zakresie błędu pomiaru użytego przepływomierza.

Opisany trend przebiegu zależności  $K_{rz}^*(\alpha)$  potwierdzają zamieszczone poniżej wykresy zależności wartości  $K_{rz}^*$  od odległości przekroju pomiarowego dla poszczególnych kątów. Dla wszystkich kątów  $\alpha$  widoczne jest wyraźne wyrównanie się prędkości  $v_p$  i  $v_z$  wraz ze wzrostem odległości przekroju pomiarowego od zasuwy, co objawia się w zbliżaniu się wartości współczynnika  $K_{rz}^*$  do wartości  $= 1 \pm$  błąd pomiarowy przepływomierza. Największa różnica między maksymalną i minimalną wartością  $K_{rz}^*$  występuje dla wspomnianych wcześniej kątów  $\alpha=0^\circ$  i  $330^\circ$ . Natomiast najmniejsze różnice widoczne są na wykresach  $K_{rz}^*(d)$  dla kątów  $\alpha=60^\circ$  dla którego wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w zakresie (1,01 , 1,06),  $\alpha=90^\circ$  dla którego wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w zakresie (0,97 , 1,03),  $\alpha=270^\circ$  dla którego wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w zakresie (0,975 , 1,015) oraz  $\alpha=300^\circ$  dla którego wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w zakresie (1,01 , 1,06).

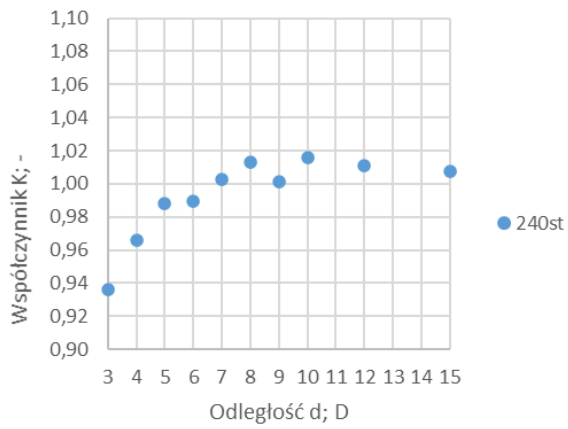
Tabela 6.35. Graficzna prezentacja zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla 1/3 wysokości zamknięcia zasuwy nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu Z przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$ .



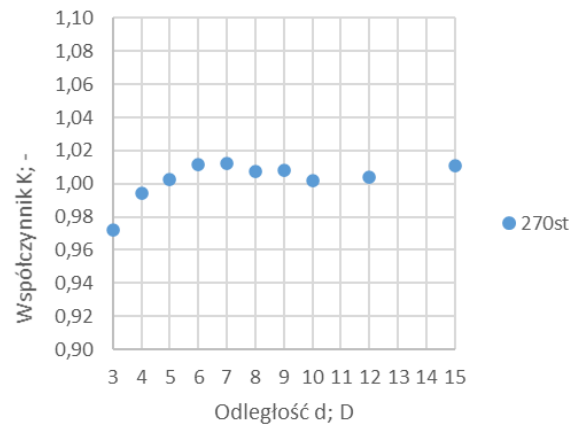




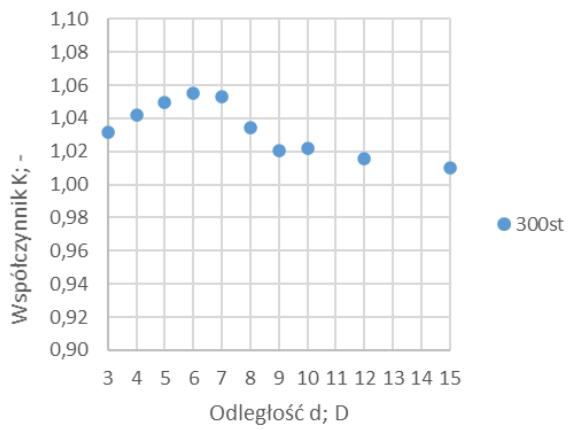
Zależność  $K(d)$  dla  $240^\circ$



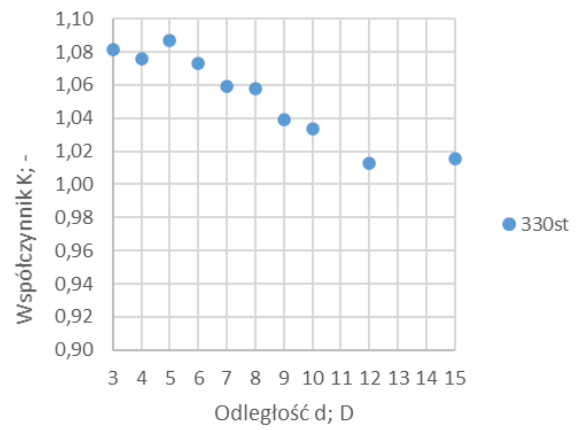
Zależność  $K(d)$  dla  $270^\circ$



Zależność  $K(d)$  dla  $300^\circ$



Zależność  $K(d)$  dla  $330^\circ$



### 6.1.5 Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 70\ 000$ i układzie głowic V

Poniżej w rozdziale 6.1.5 zamieszczono wyniki pomiarów i obliczeń dla serii pomiarowej wykonanej przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw nożowej, przy liczbie Reynoldsa przepływu  $Re \approx 70\ 000$  i ustawieniu głowic przepływomierza ultradźwiękowego typu V. W tabelach 6.36-6.46 zostały umieszczone wykresy stworzone na podstawie danych pomiarowych oraz rezultatów obliczeń.

Tabela 6.36. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 3D.

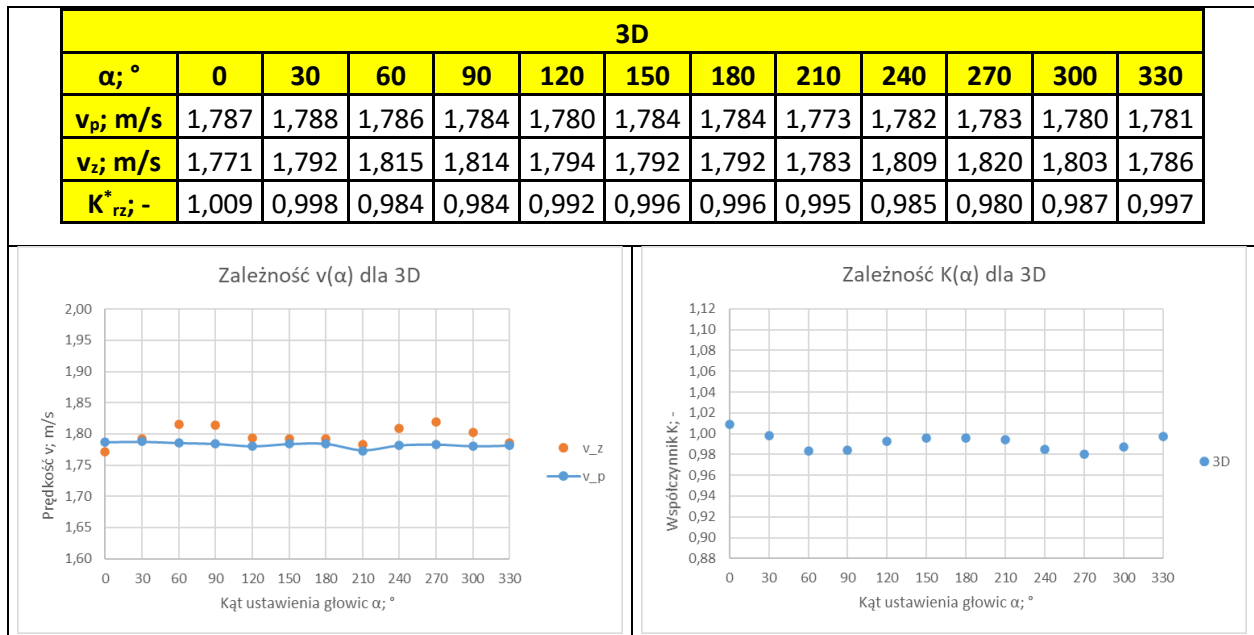


Tabela 6.37. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 4D.

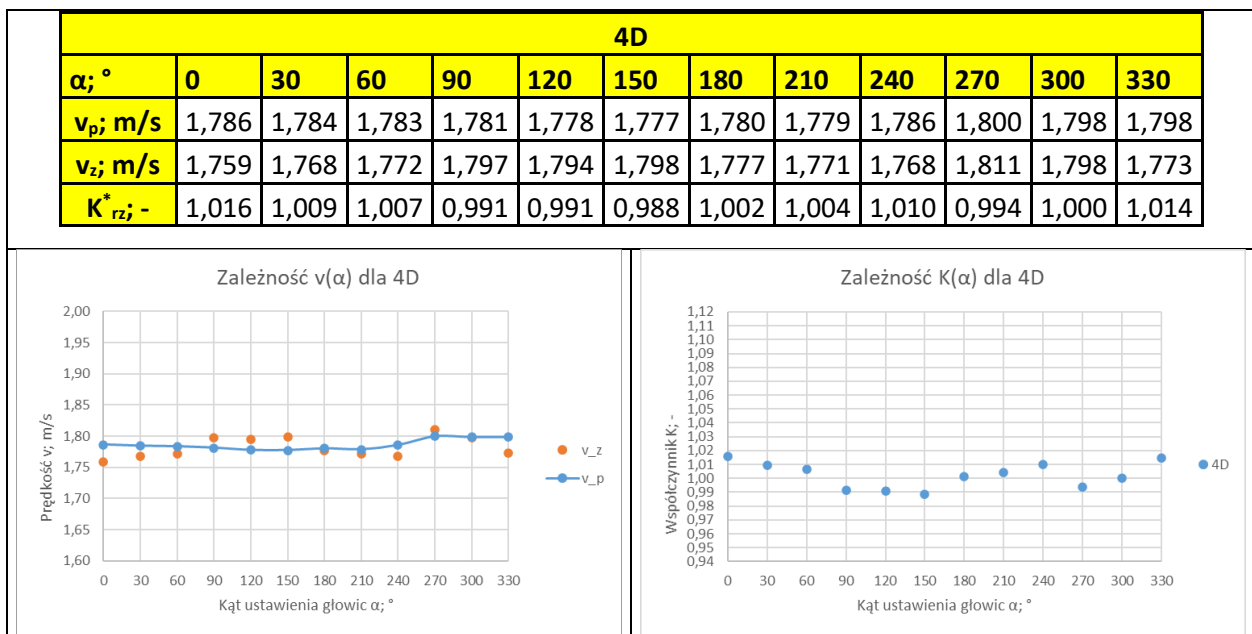


Tabela 6.38. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 5D.

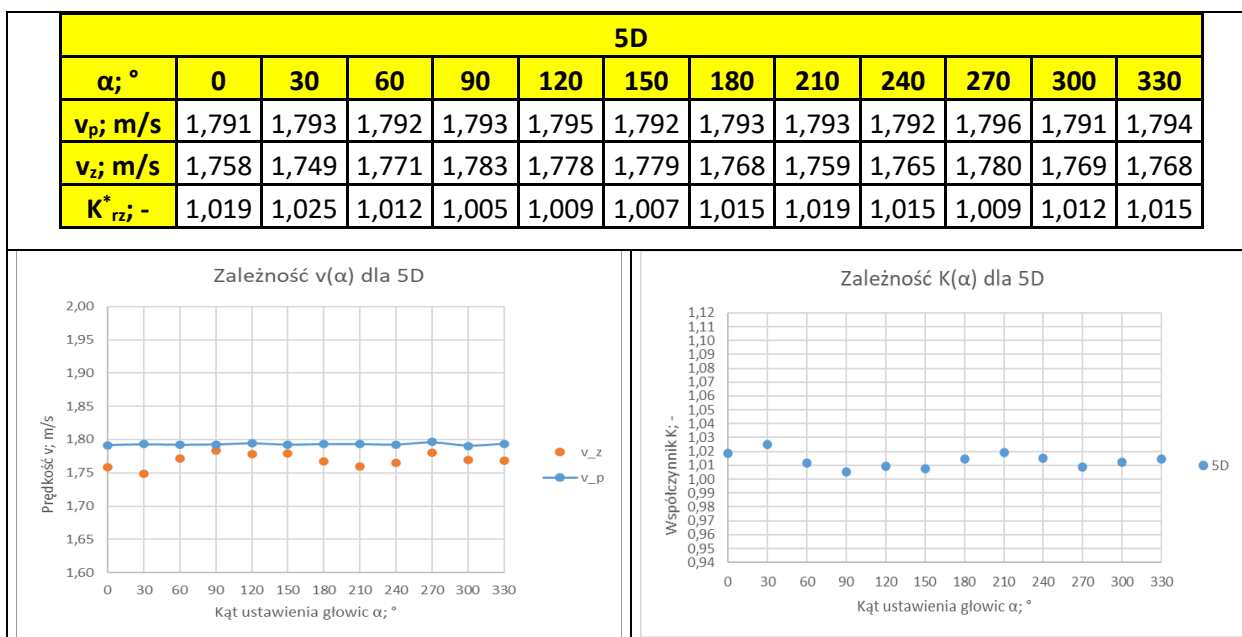


Tabela 6.39. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 6D.

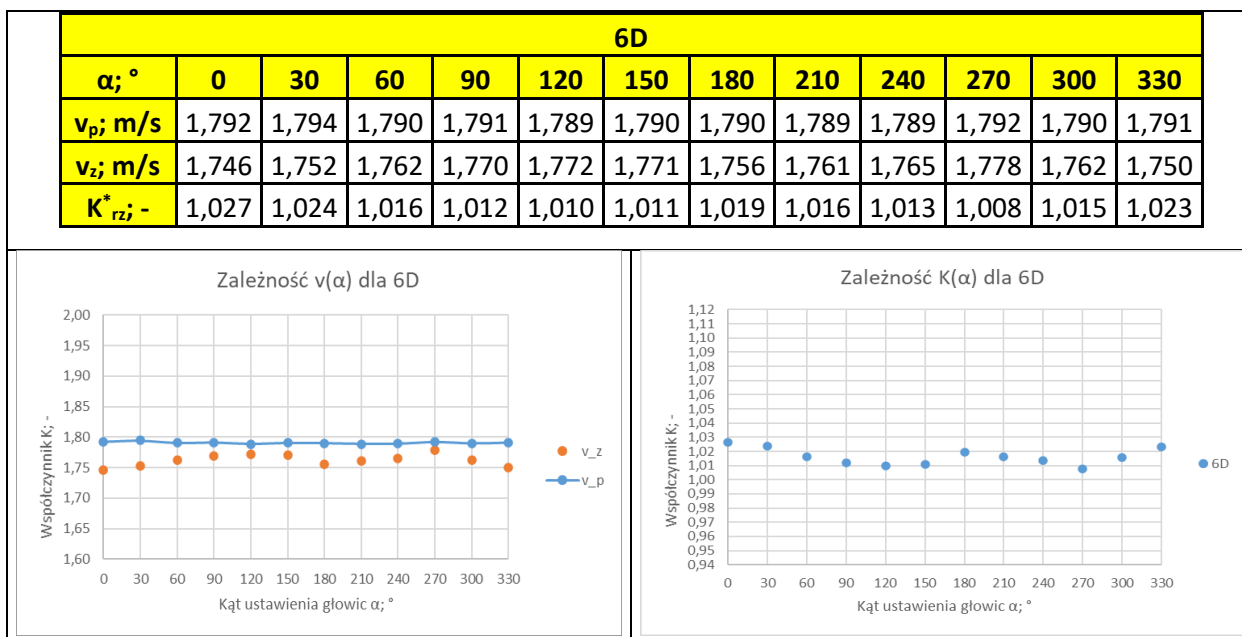


Tabela 6.40. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 7D.

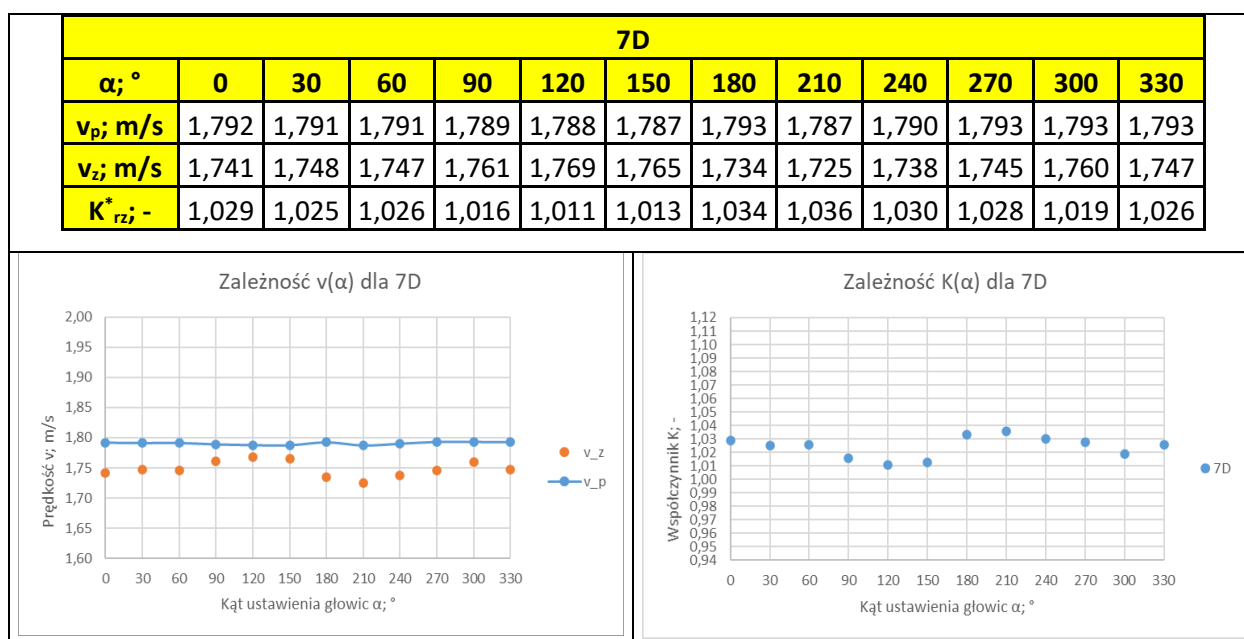


Tabela 6.41. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 8D.

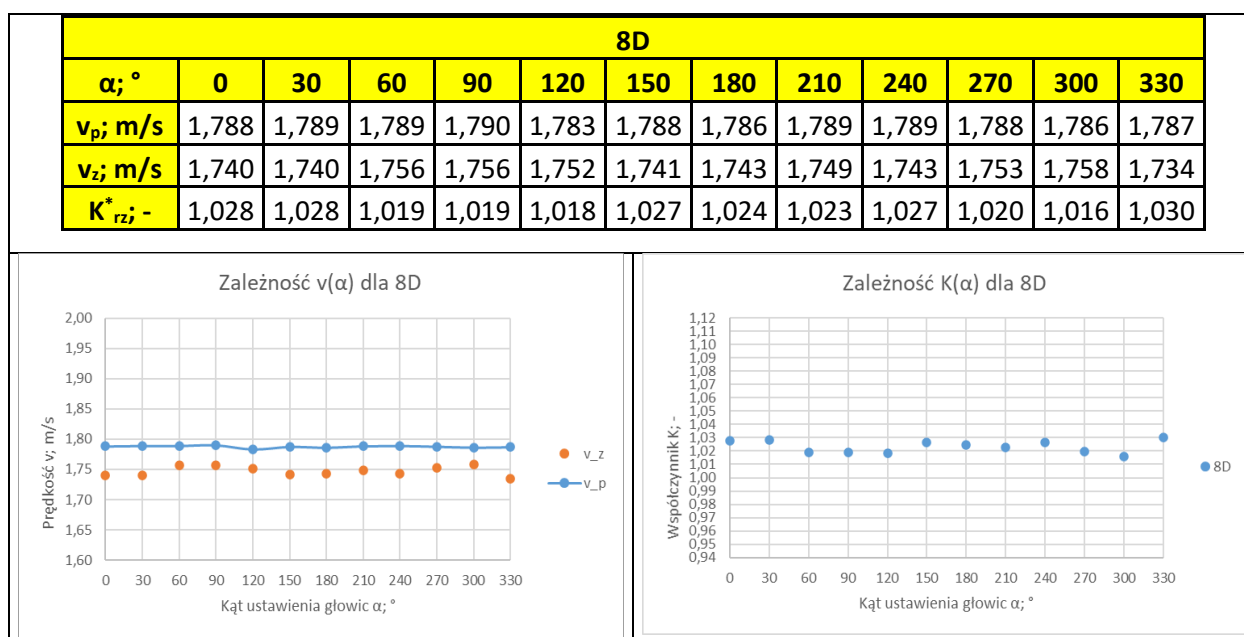


Tabela 6.42. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 9D.

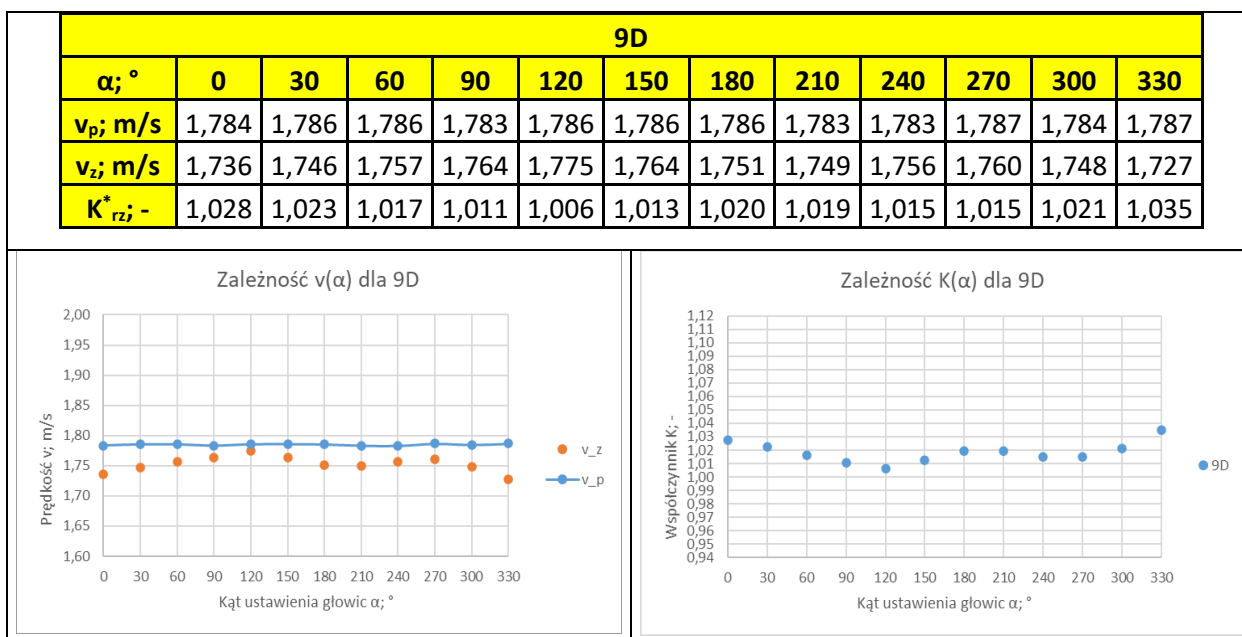


Tabela 6.43. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 10D.

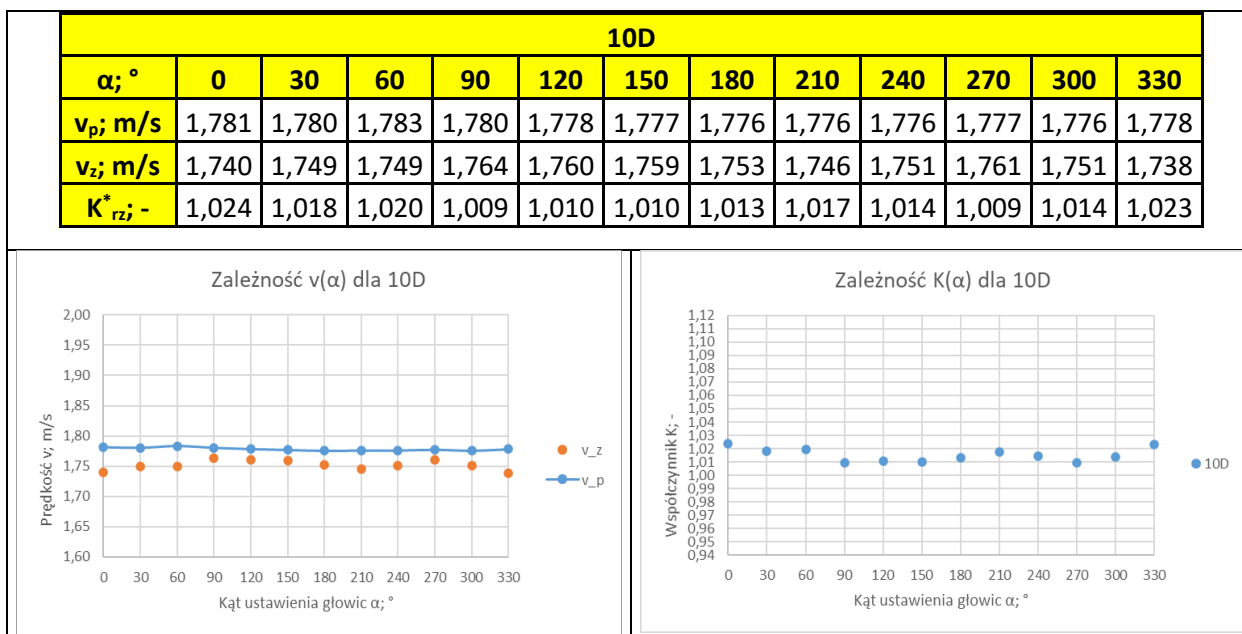


Tabela 6.44. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 12D.

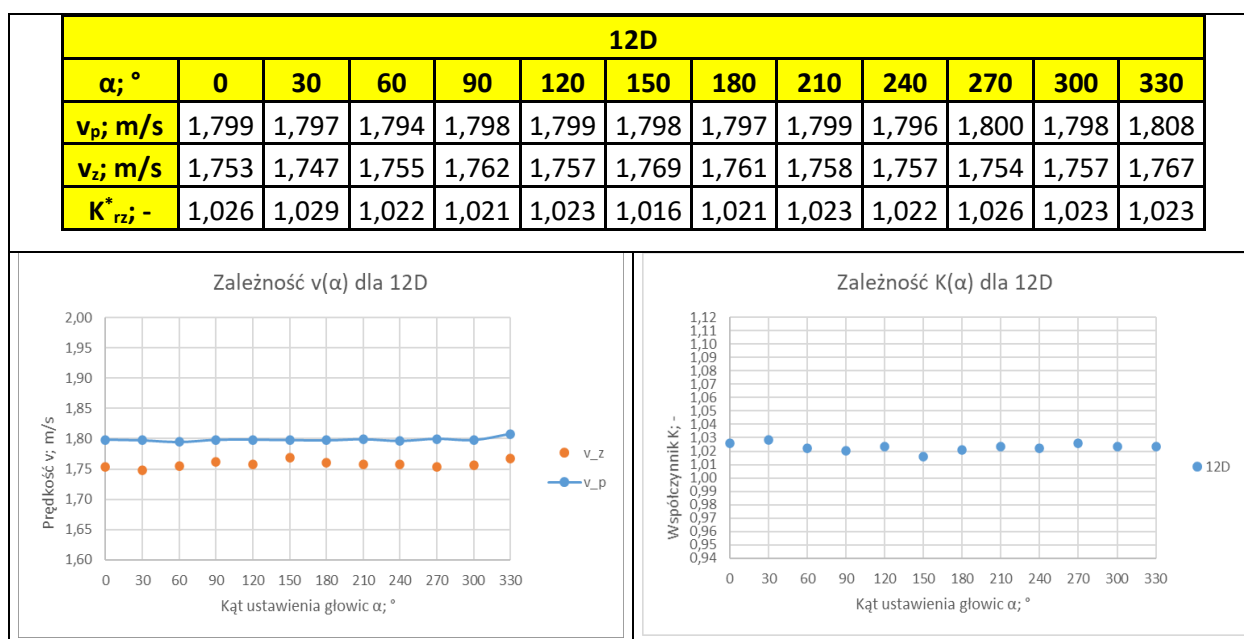
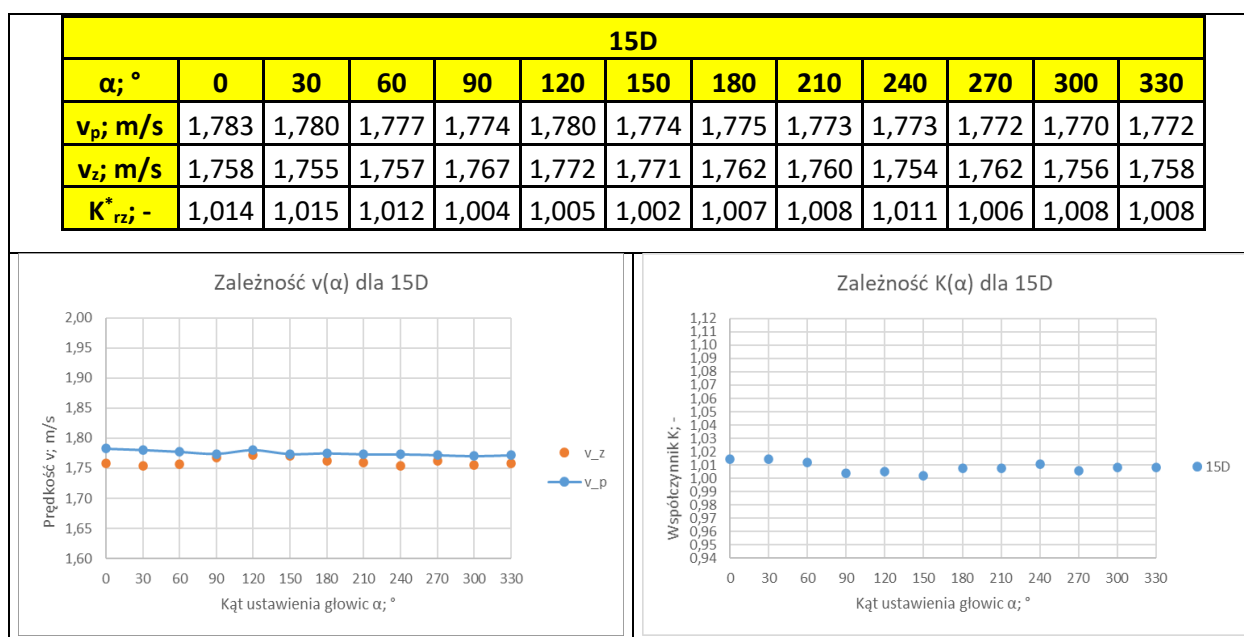


Tabela 6.45. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 15D.

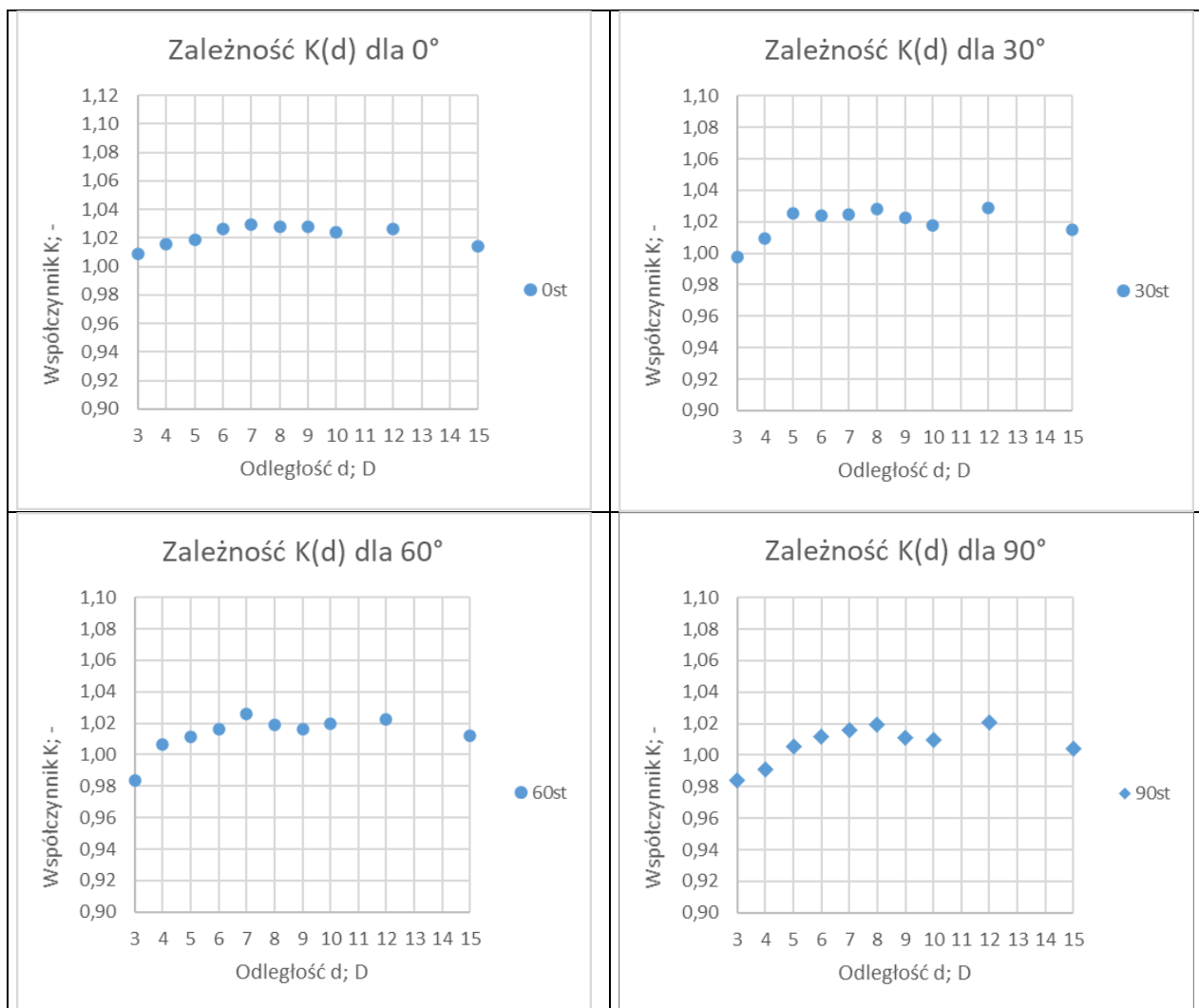


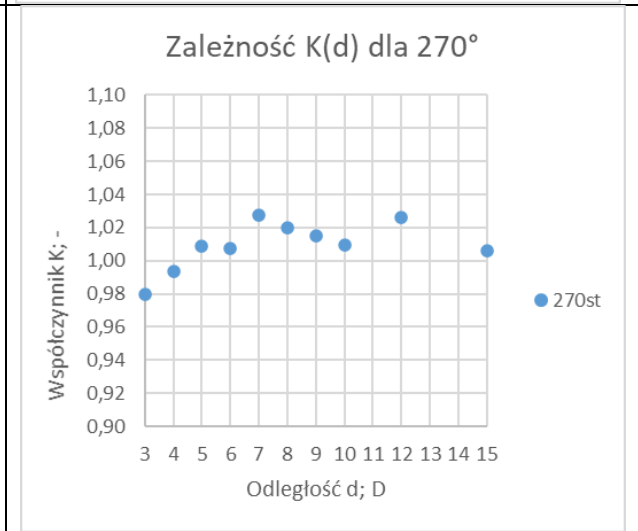
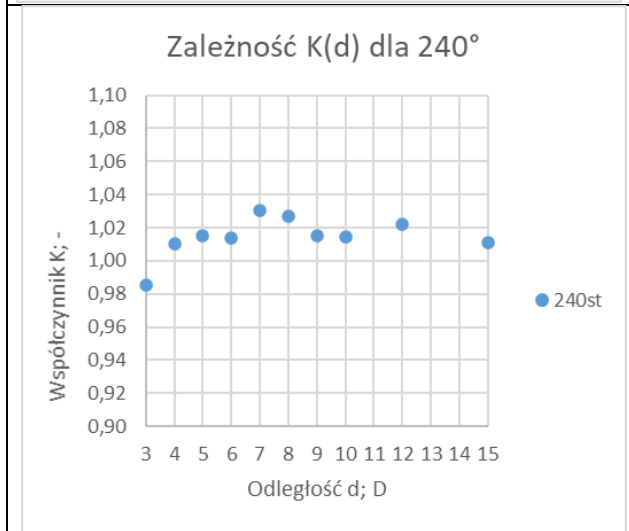
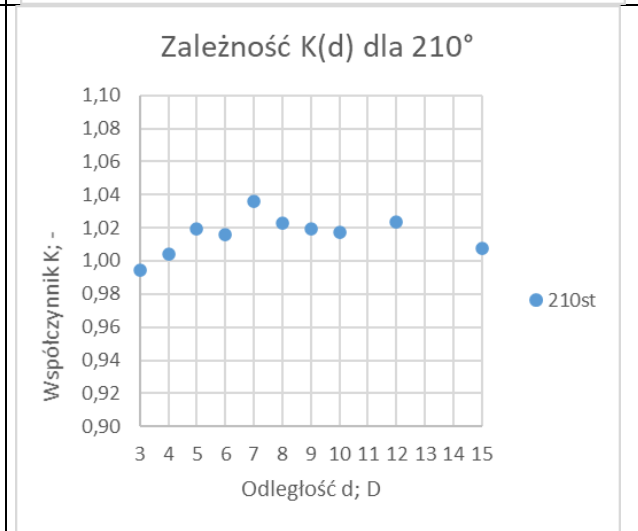
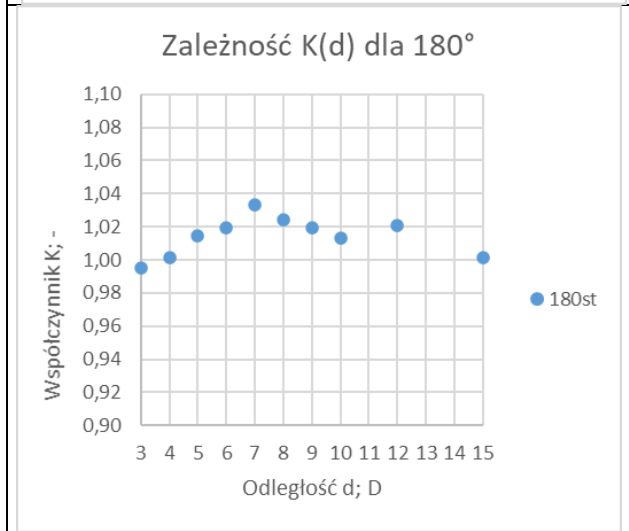
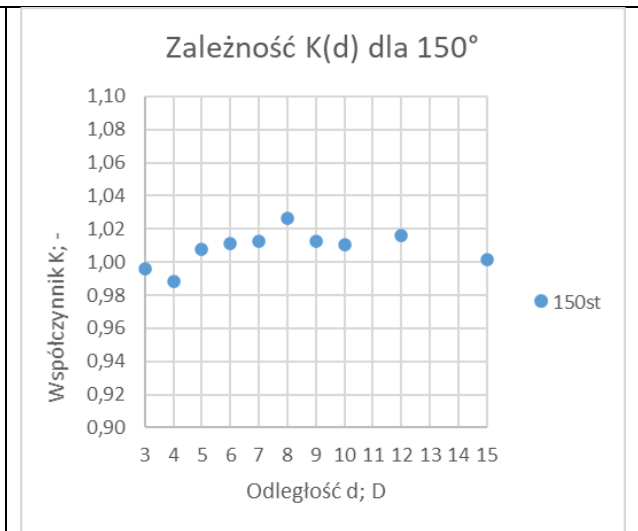
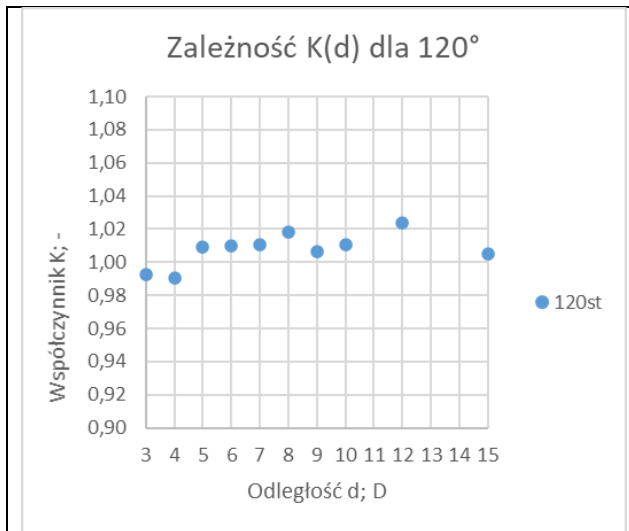
Podobnie jak dla pomiarów wykonanych dla  $Re \approx 35\,000$ , w przebiegu zależności  $K_{rz}^*(\alpha)$  dla ustawienia głowic ultradźwiękowych typu V widzimy zasadnicze różnice w porównaniu z przebiegiem zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla ustawienia głowic typu Z. W układzie typu V, z podwójnym przejściem fali ultradźwiękowej, różnice pomiędzy minimalną i maksymalną wartością  $K_{rz}^*$  dla poszczególnych kątów  $\alpha$  są wyraźnie mniejsze. Wraz ze zwiększeniem odległości przekroju pomiarowego od zasowy przebieg zależności ulega nieznacznemu spłaszczeniu. Rozrzut wartości w zależności od kąta  $\alpha$  jest znacznie mniejszy niż w przypadku pomiarów wykonanych w ustawieniu głowic typu Z. W przypadku pomiaru wykonanego przekroju pomiarowym 3D zbiór wartości  $K_{rz}^*$  stanowił zakres (0,980 , 1,009), dla przekroju 5D zbiór wartości stanowił zakres (1,005 , 1,025), dla przekroju 10D (1,009 , 1,024), a dla przekroju 15D (1,002 , 1,015). Widoczne jest więc, że pomiary prędkości

wykonywane przy użyciu przepływomierza ultradźwiękowego w układzie głowic typu V są znacznie mniej zależne od wpływu zaburzeń przepływu niż pomiary wykonywane dla układu głowic typu Z i wybór kąta  $\alpha$  ustawienia głowic w układzie typu V ma znacznie mniejsze znaczenie niż w układzie typu Z.

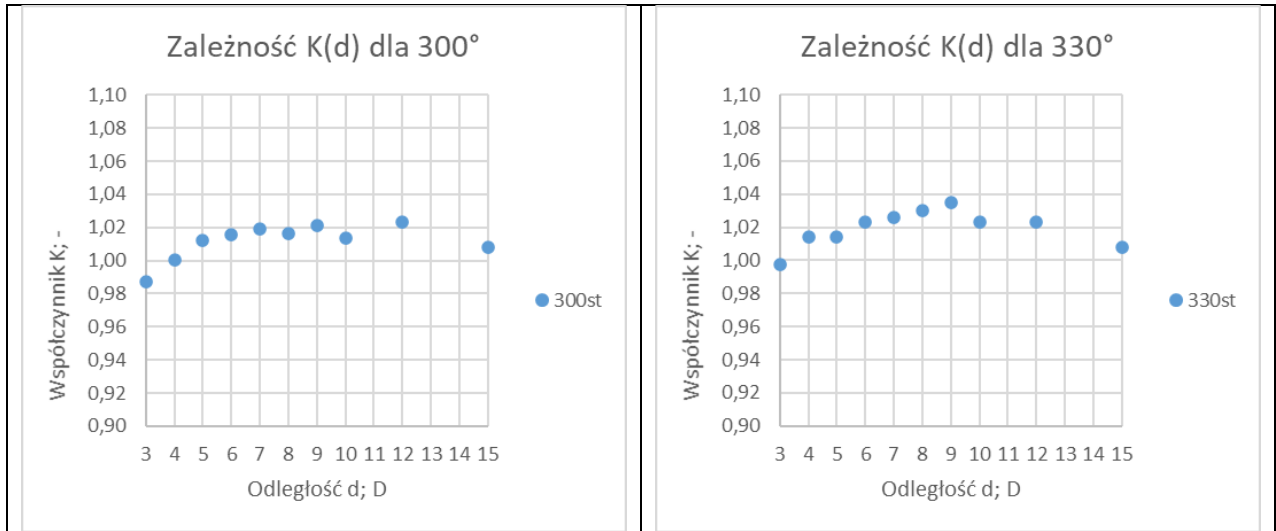
Opisany powyżej przebieg zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  potwierdzają zamieszczone poniżej wykresy zależności wartości  $K_{rz}^*$  od odległości przekroju pomiarowego dla poszczególnych kątów. Dla wszystkich kątów  $\alpha$  widoczne jest wyrównanie się prędkości  $v_p$  i  $v_z$  wraz ze wzrostem odległości przekroju pomiarowego od zasowy, co objawia się w zbliżaniu się wartości współczynnika  $K_{rz}^*$  do wartości  $K_{rz}^* = 1 \pm$  błąd pomiarowy przepływomierza. Co warto zauważyć dla wszystkich kątów  $\alpha$  w przekroju pomiarowym 3D znajdującym się najbliżej zasowy wartość  $K_{rz}^*$  mieści się w zakresie  $1 \pm$  błąd pomiarowy przepływomierza. Następnie zauważalny jest wzrost wartości  $K_{rz}^*$  w miarę zwiększania odległości przekroju pomiarowego od zasowy, po czym osiągając maksimum w przekroju 7D lub 8D wartość  $K_{rz}^*$  zaczyna stabilizować się na poziomie  $K_{rz}^* = 1 \pm$  błąd pomiarowy przepływomierza.

Tabela 6.46. Graficzna prezentacja zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla 1/3 wysokości zamknięcia zasowy nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu V przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$ .







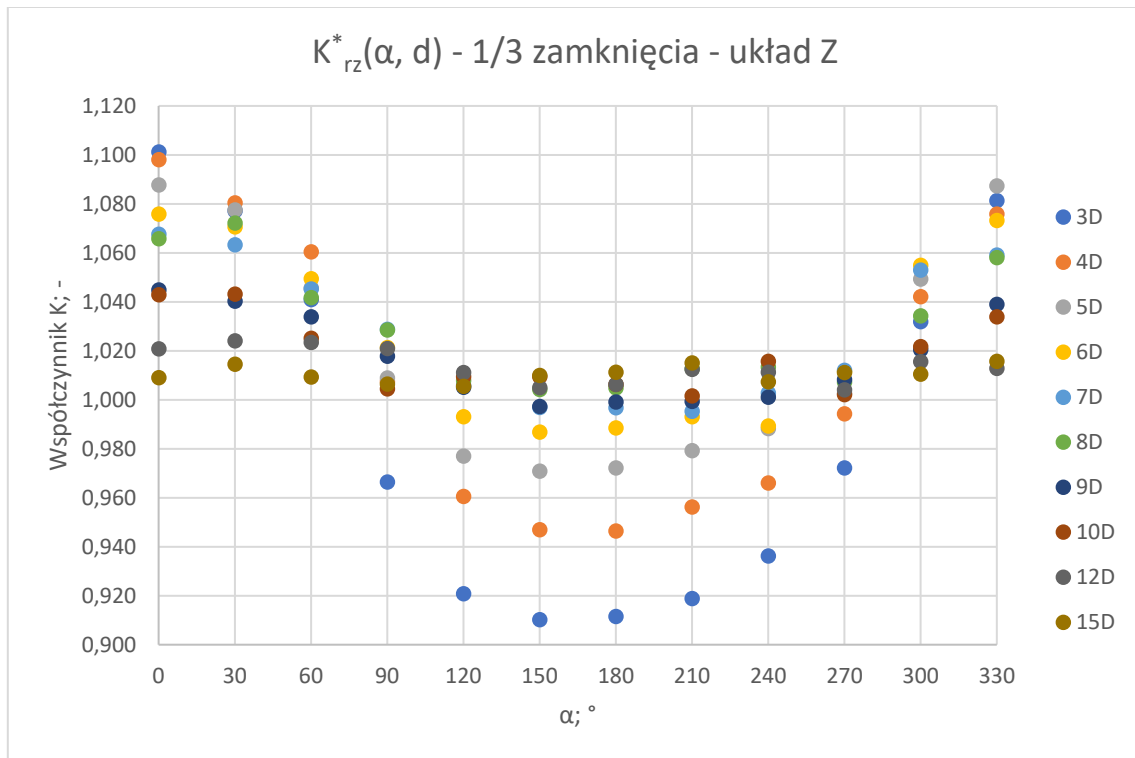


### 6.1.6 Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 70\ 000$ – podsumowanie

W rozdziale 6.1.6 zamieszone zostały zbiorcze wyniki pomiarów wykonanych przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw nożowej, przy liczbie Reynoldsa przepływu  $Re \approx 70\ 000$  dla ustawień głowic ultradźwiękowych typu Z i typu V. Stworzone wykresy zależności  $K(\alpha, d)$  rys. 6.3 i rys. 6.4 pozwalają na porównanie rezultatów badań dla obu ustawień głowic ultradźwiękowych.

Tabela 6.47. Zbiorcze zestawienie zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla 1/3 wysokości zamknięcia zasuw nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu Z przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$ .

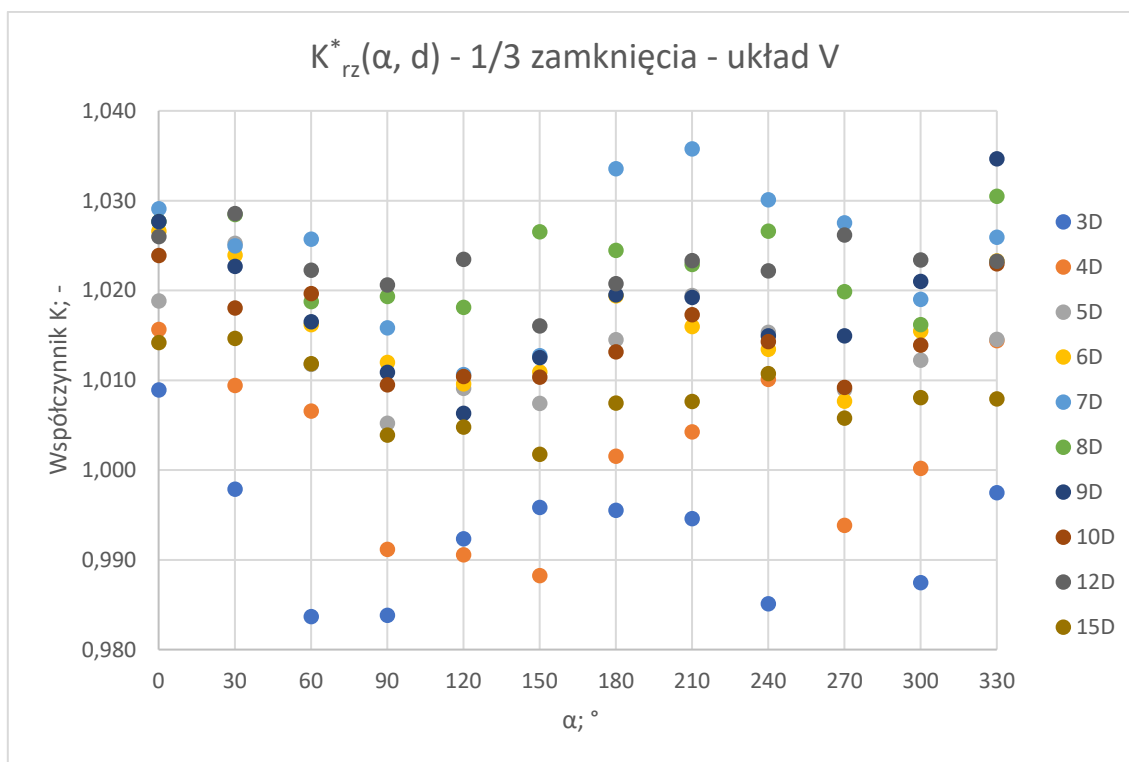
Re $\approx$ 70 000 - układ Z												
$\alpha; ^\circ$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
3D	1,101	1,077	1,041	0,966	0,921	0,910	0,911	0,919	0,936	0,972	1,032	1,081
4D	1,098	1,080	1,060	1,007	0,960	0,947	0,946	0,956	0,966	0,994	1,042	1,076
5D	1,088	1,077	1,046	1,009	0,977	0,971	0,972	0,979	0,988	1,003	1,049	1,087
6D	1,076	1,071	1,049	1,021	0,993	0,987	0,988	0,993	0,989	1,011	1,055	1,073
7D	1,068	1,063	1,045	1,029	1,006	0,997	0,997	0,995	1,003	1,012	1,053	1,059
8D	1,066	1,072	1,042	1,028	1,008	1,004	1,005	1,013	1,013	1,007	1,034	1,058
9D	1,045	1,040	1,034	1,018	1,005	0,997	0,999	0,999	1,001	1,008	1,020	1,039
10D	1,043	1,043	1,025	1,004	1,009	1,009	1,006	1,002	1,016	1,002	1,022	1,034
12D	1,021	1,024	1,023	1,021	1,011	1,005	1,006	1,012	1,011	1,004	1,015	1,013
15D	1,009	1,014	1,009	1,006	1,005	1,010	1,011	1,015	1,007	1,011	1,010	1,016



Rys. 6.3. Wykres zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla 1/3 wysokości zamknięcia zasuw nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu Z przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$ .

Tabela 6.48. Zbiornicze zestawienie zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla  $1/3$  wysokości zamknięcia zasuw nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu V przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$ .

Re $\approx$ 70 000 - układ V												
$\alpha; ^\circ$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
3D	1,009	0,998	0,984	0,984	0,992	0,996	0,996	0,995	0,985	0,980	0,987	0,997
4D	1,016	1,009	1,007	0,991	0,991	0,988	1,002	1,004	1,010	0,994	1,000	1,014
5D	1,019	1,025	1,012	1,005	1,009	1,007	1,015	1,019	1,015	1,009	1,012	1,015
6D	1,027	1,024	1,016	1,012	1,010	1,011	1,019	1,016	1,013	1,008	1,015	1,023
7D	1,029	1,025	1,026	1,016	1,011	1,013	1,034	1,036	1,030	1,028	1,019	1,026
8D	1,028	1,028	1,019	1,019	1,018	1,027	1,024	1,023	1,027	1,020	1,016	1,030
9D	1,028	1,023	1,017	1,011	1,006	1,013	1,020	1,019	1,015	1,015	1,021	1,035
10D	1,024	1,018	1,020	1,009	1,010	1,010	1,013	1,017	1,014	1,009	1,014	1,023
12D	1,026	1,029	1,022	1,021	1,023	1,016	1,021	1,023	1,022	1,026	1,023	1,023
15D	1,014	1,015	1,012	1,004	1,005	1,002	1,007	1,008	1,011	1,006	1,008	1,008

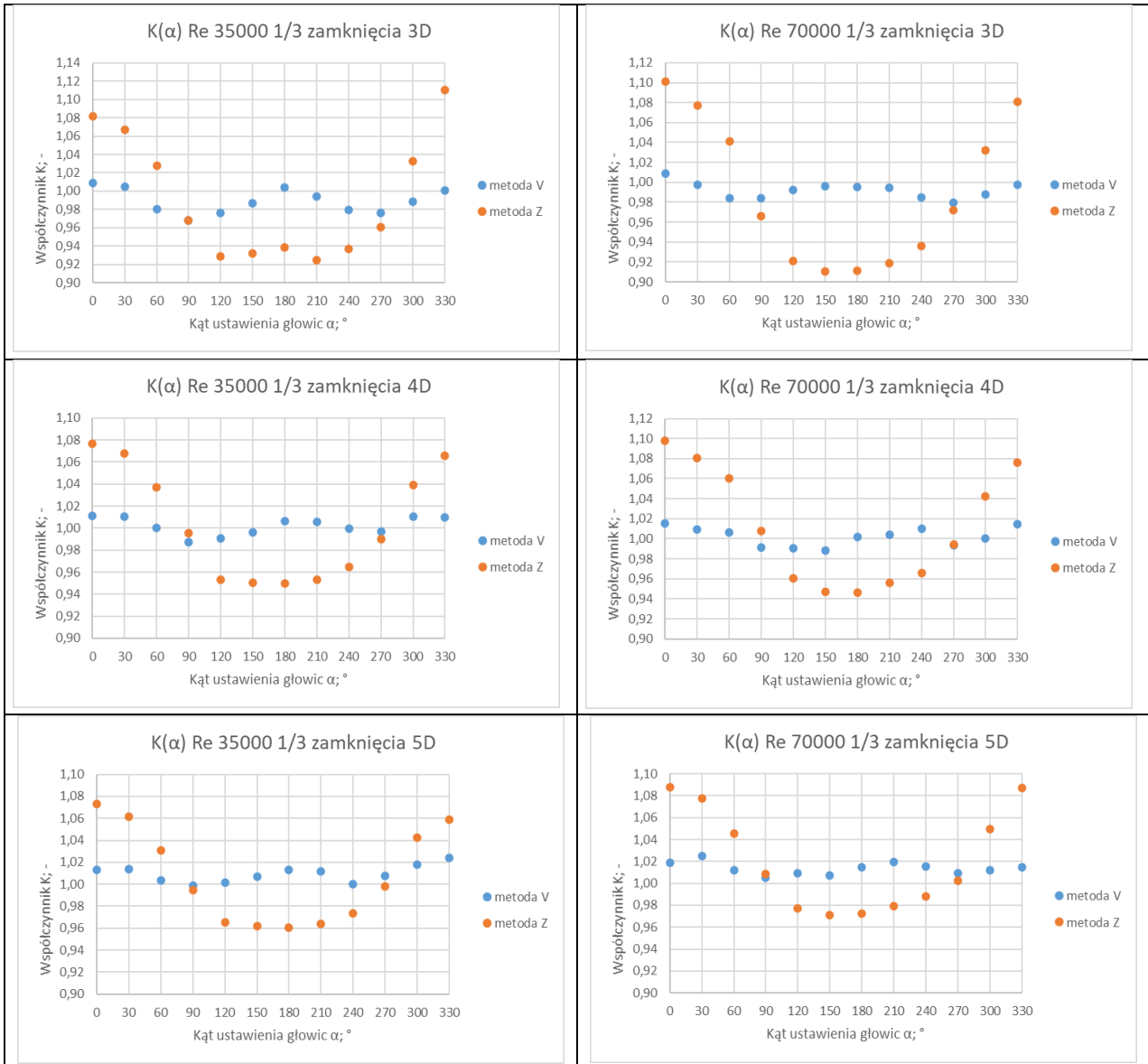


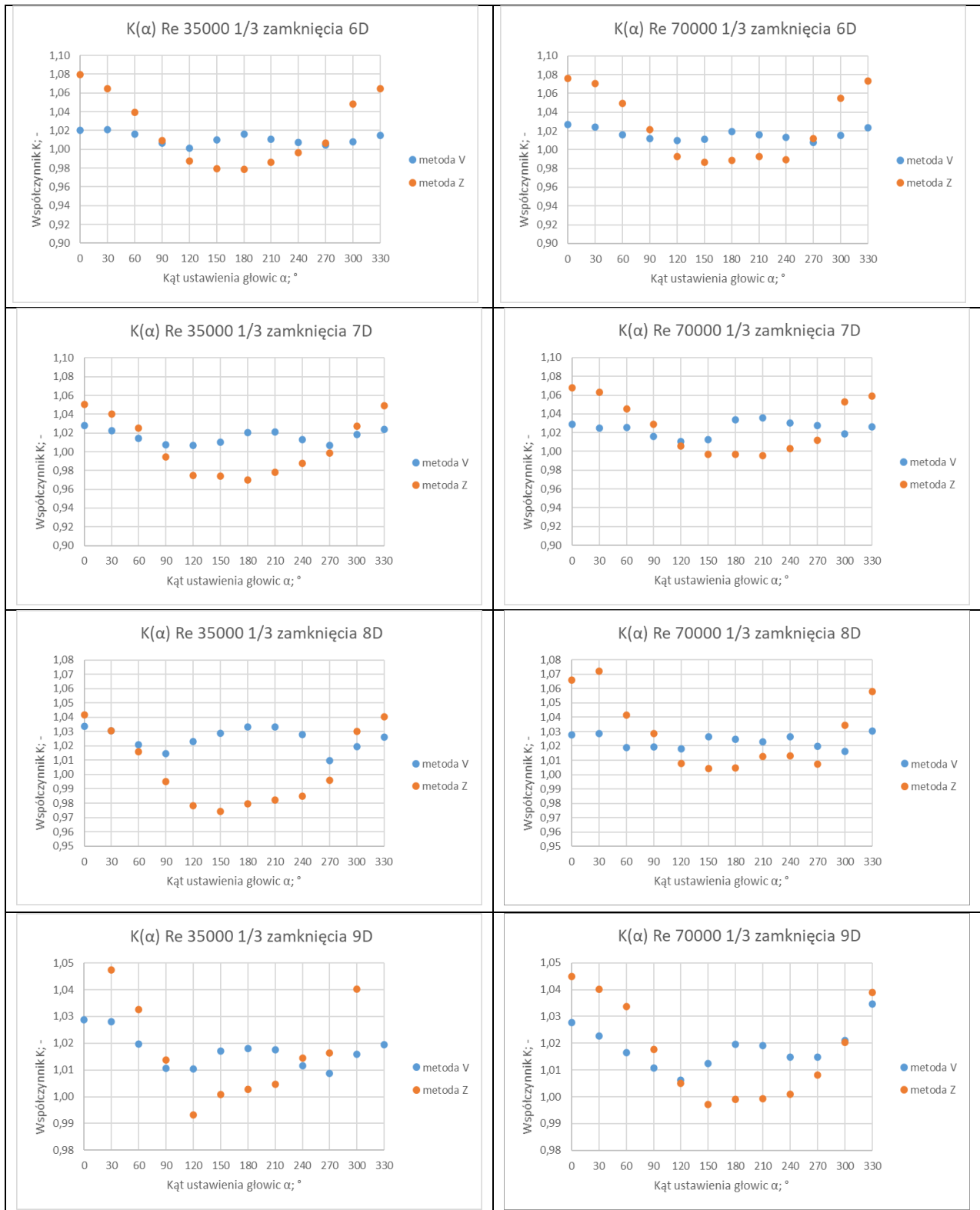
Rys. 6.4. Wykres zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla  $1/3$  wysokości zamknięcia zasuw nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu Z przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$ .

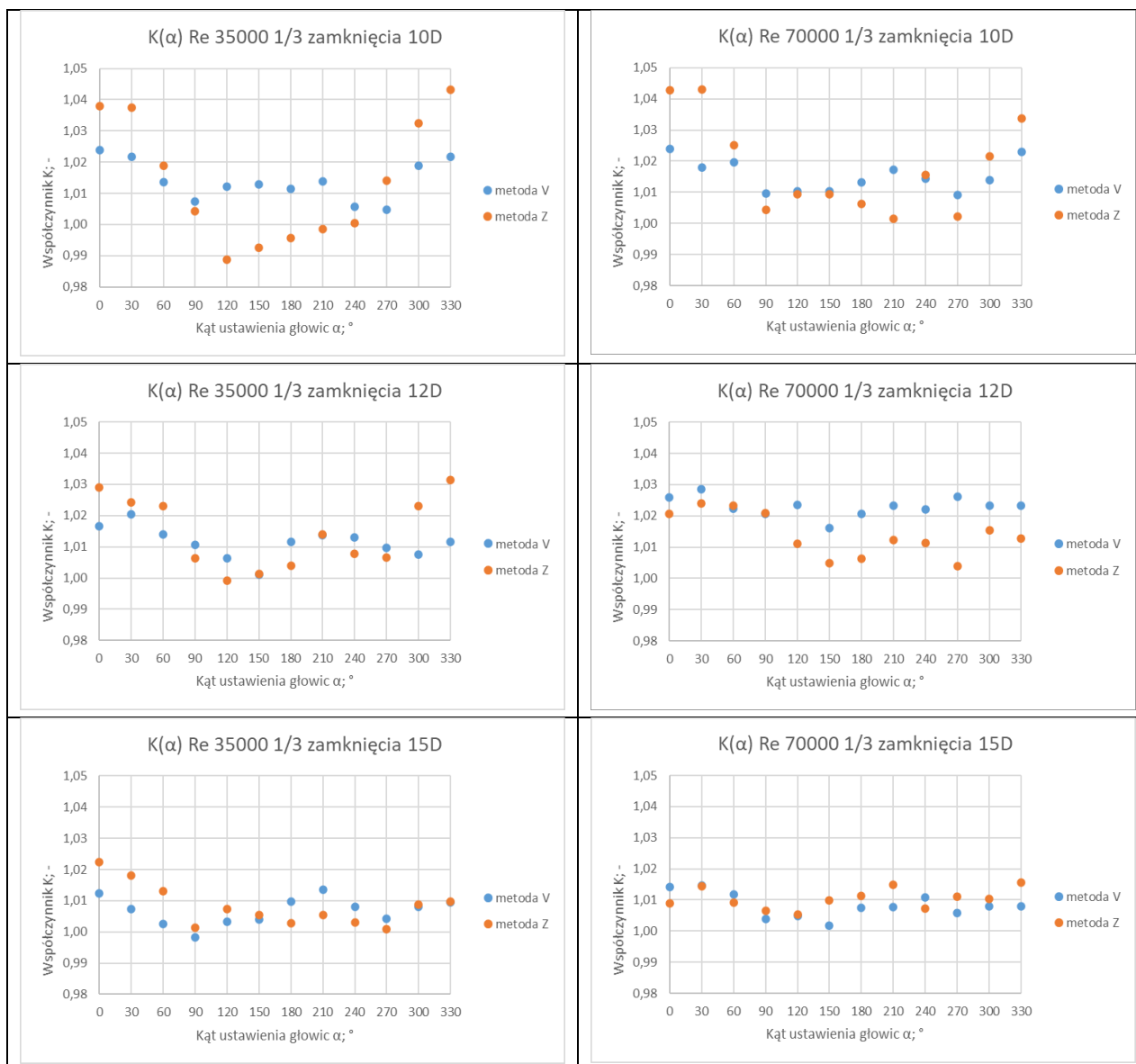
### 6.1.7 1/3 zamknięcia – podsumowanie wszystkich serii pomiarowych

W tabeli 6.49 zamieszczono wykresy stworzone na podstawie pomiarów wykonanych przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuwy nożowej. Na wykresach stworzonych dla różnych liczb Reynoldsa ( $Re \approx 35\ 000$  i  $Re \approx 70\ 000$ ) zamieszczono dane dla serii pomiarowych reprezentujących ustawienie głowic ultradźwiękowych typu Z i typu V.

Tabela 6.49 Zbiornicze zestawienie zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla 1/3 wysokości zamknięcia zasuwy nożowej przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$  i  $Re \approx 70\ 000$ .







Wykresy zbiorcze zawierają dane z serii pomiarowych wykonanych przy 1/3 zamknięcia zasowy dla różnych wartości liczby Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$  i  $Re \approx 70\ 000$ . Na wykresach zamieszczono 2 serie danych: dane pochodzące z pomiarów wykonanych w ustawieniu głowic przepływomierza typu Z i ustawieniu typu V. Analiza wykresów potwierdza sformułowane wcześniej, przy okazji analizy wykonywanej dla poszczególnych serii pomiarowych, wnioski. Należy zaakcentować następujące konkluzje:

- Ustawienie głowic w układzie V skutkuje znacznie mniejszym rozrzutem wartości prędkości dla poszczególnych kątów niż ustawienie typu Z. Spowodowane jest to podwójnym przejściem fali ultradźwiękowej pomiędzy czujnikami w ustawieniu typu V, co pozwala uśrednić prędkość w większej przestrzeni przepływu pomiędzy czujnikami niż ustawienie typu Z,
- Ustawienie głowic typu V wykazuje znacznie mniejszą zmienność w zależności od odległości przekroju pomiarowego od zasowy, będącej źródłem zaburzeń przepływu. Dlatego wartości zmierzone w układzie typu V wykazują znacznie mniejsze wahania w strefie znajdującej się najbliżej zasowy niż wartości zmierzone w układzie typu Z,

- Wraz ze wzrostem odległości przekroju pomiarowego od zasowy wartości współczynnika  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  zbiegają do siebie tj. wartości zmierzone w układzie głowic typu Z stabilizują się na określonym poziomie, wykazują coraz mniejszą zależność od kąta ustawienia głowic  $\alpha$  i zbliżają się do wartości współczynnika  $K_{rz}^*$  wyznaczonych dla pomiarów wykonanych w układzie typu V,
- Porównując ze sobą przebieg zależności dla serii przy  $Re \approx 35\ 000$  i  $Re \approx 70\ 000$  widoczne są analogie w przebiegu zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$ . Można założyć, że zależność ta jest uniwersalna dla liczb Reynoldsa w zakresie przepływu turbulentnego. Jest to istotne, ponieważ pozwala na dobranie modelu rozkładu prędkości pozwalającego wyznaczyć współczynnik kształtu rozkładu prędkości i przy jego użyciu skompensowanie błędu pomiaru wykonywanego w warunkach niestandardowych, w odległości od przeszkody mniejsza niż wskazana w normach i zaleceniach.

## 6.2 Wyniki pomiarów prędkości przy 1/2 zamknięcia zasowy

### 6.2.1 Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 35\ 000$ i układzie głowic Z

Poniżej w rozdziale 6.2.1 zamieszczono wyniki pomiarów i obliczeń dla serii pomiarowej wykonanej przy zamknięciu 1/2 wysokości zasowy nożowej, przy liczbie Reynoldsa przepływu  $Re \approx 35\ 000$  i ustawieniu głowic przepływomierza ultradźwiękowego typu Z. W tabelach 6.50-6.60 zostały umieszczone wykresy stworzone na podstawie danych pomiarowych oraz rezultatów obliczeń.

Tabela 6.50. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 3D.

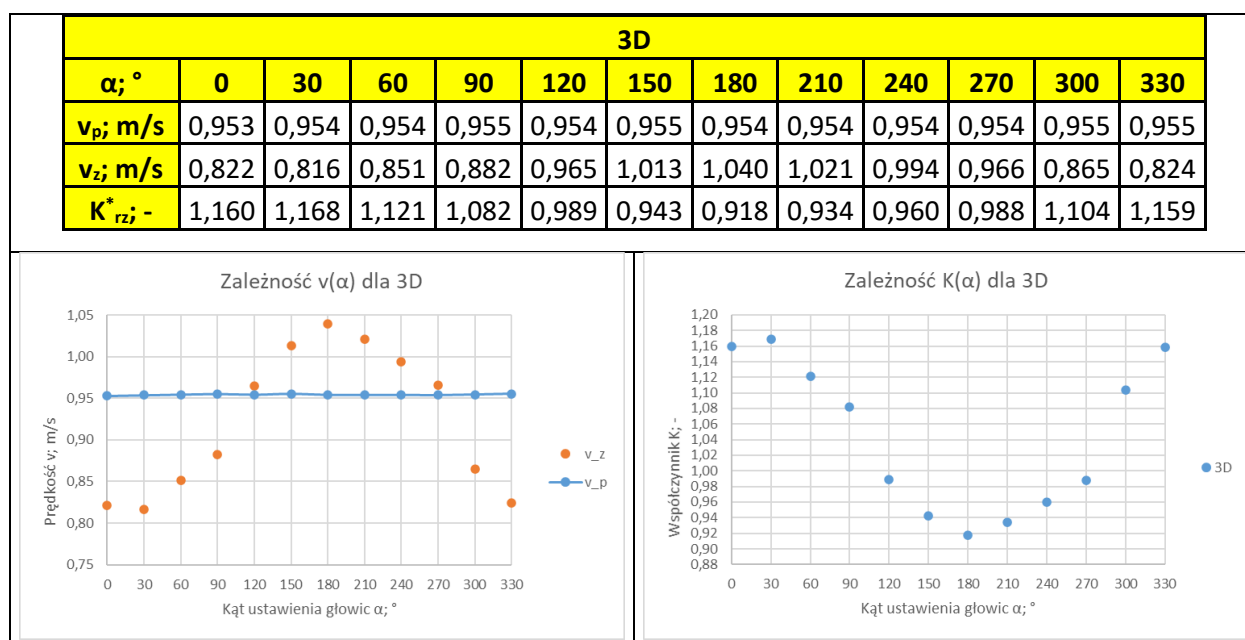


Tabela 6.51. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 4D.

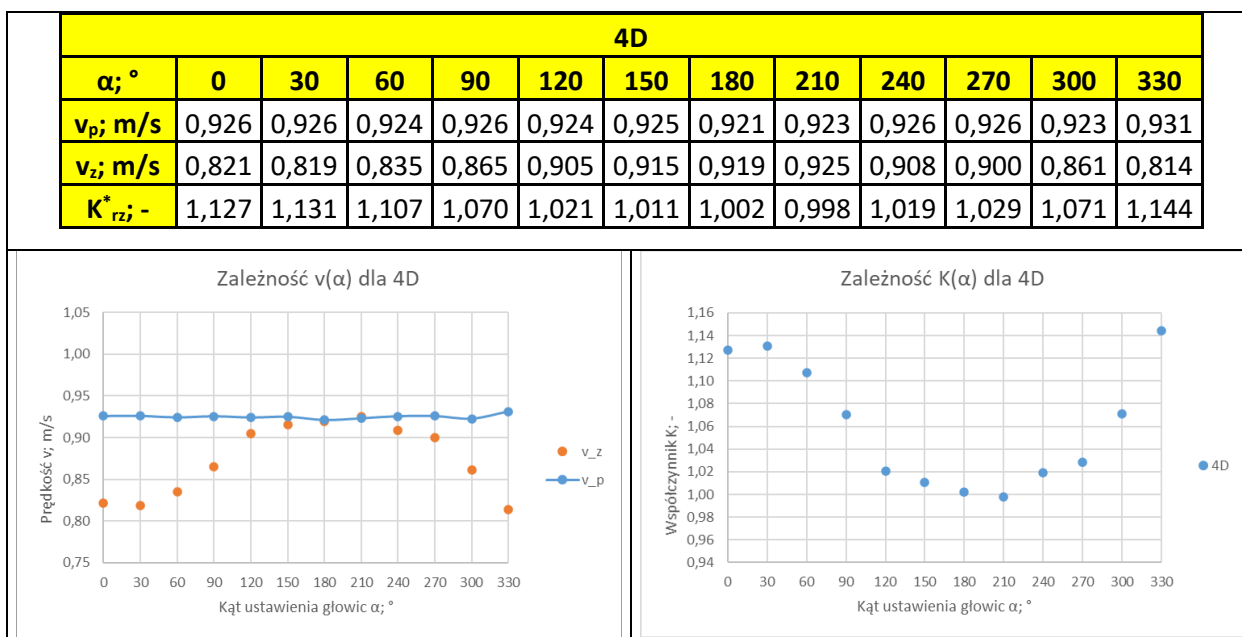


Tabela 6.52. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 5D.

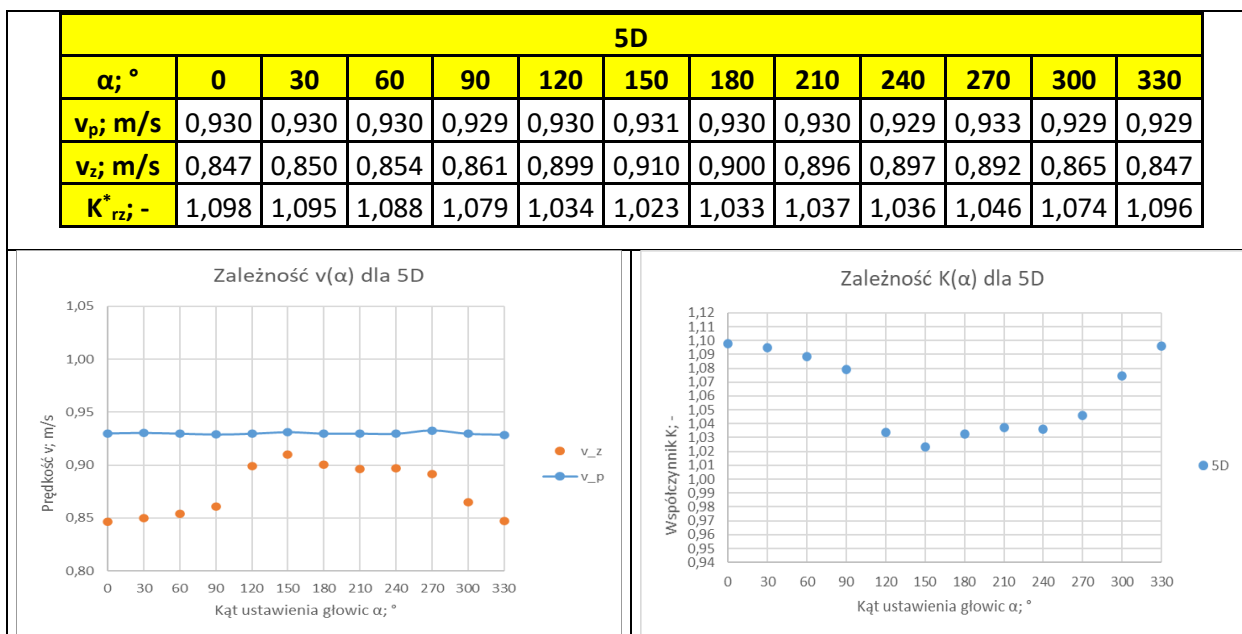




Tabela 6.53. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 6D.

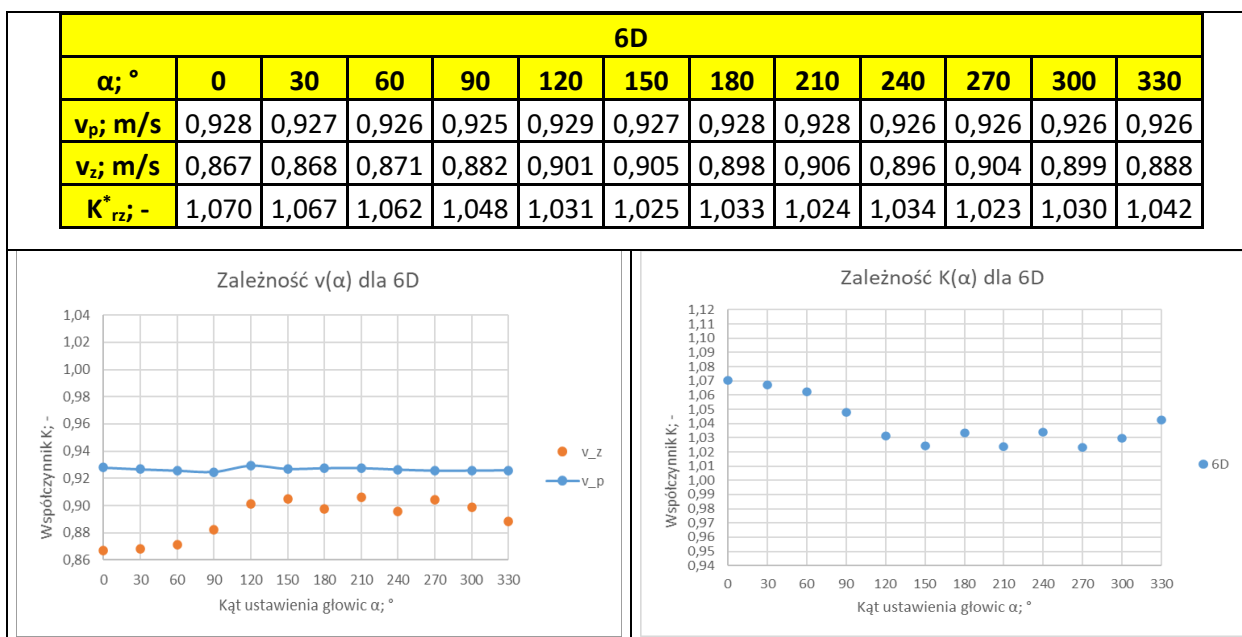


Tabela 6.54. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 7D.

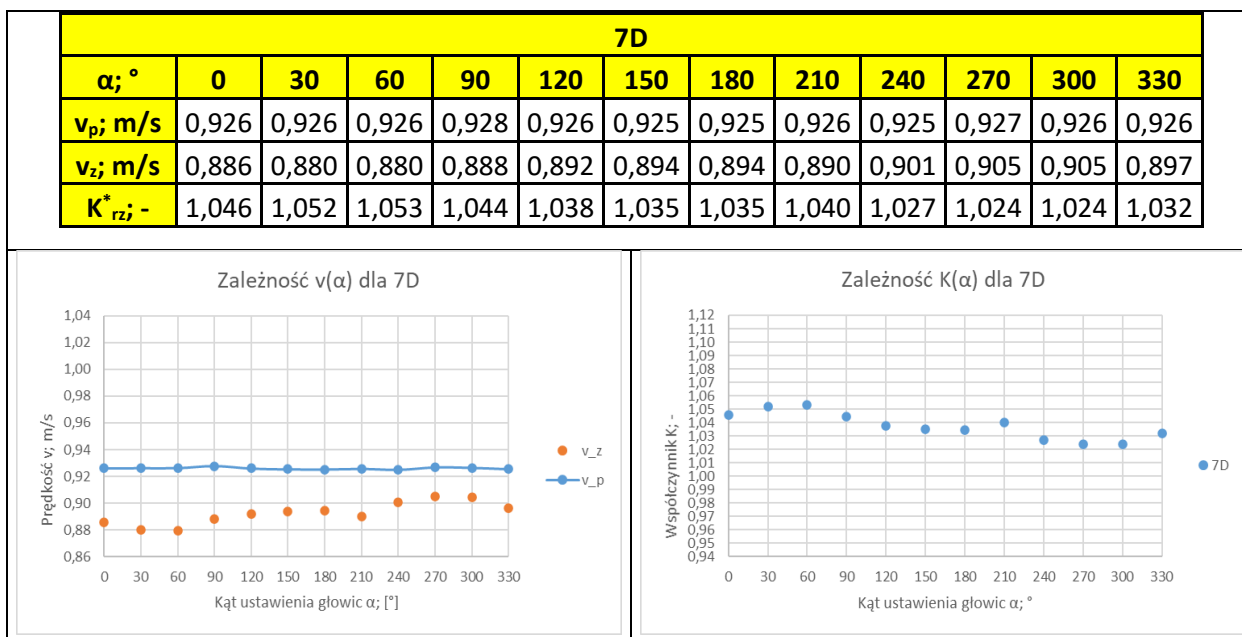


Tabela 6.55. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 8D.

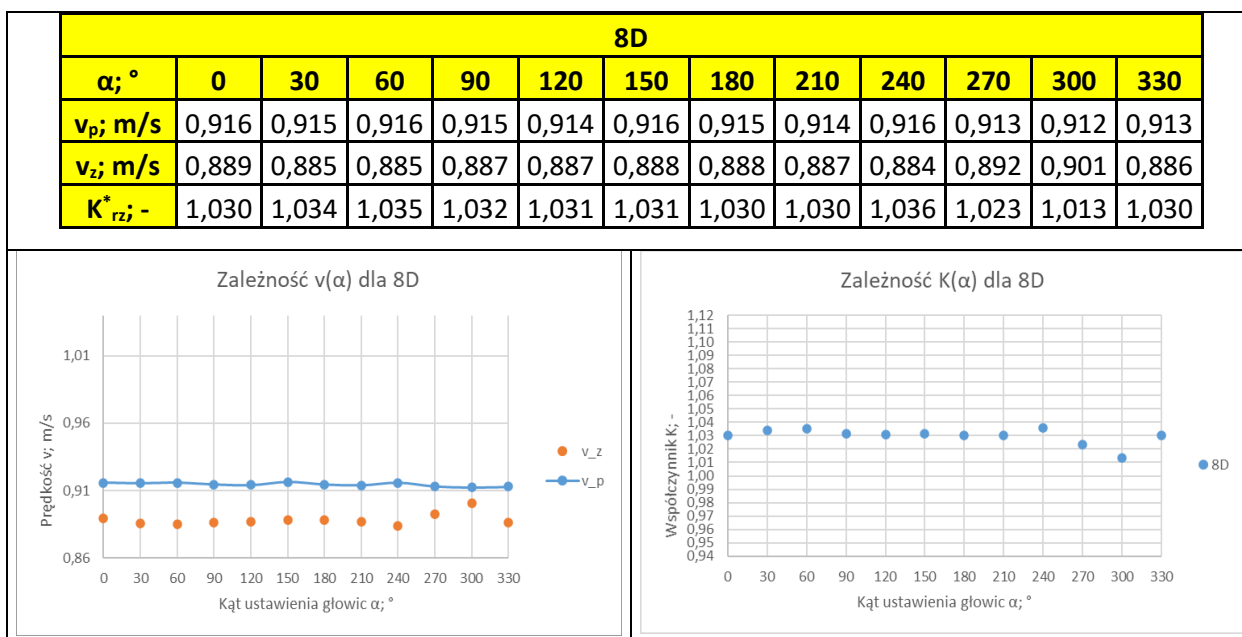


Tabela 6.56. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 9D.

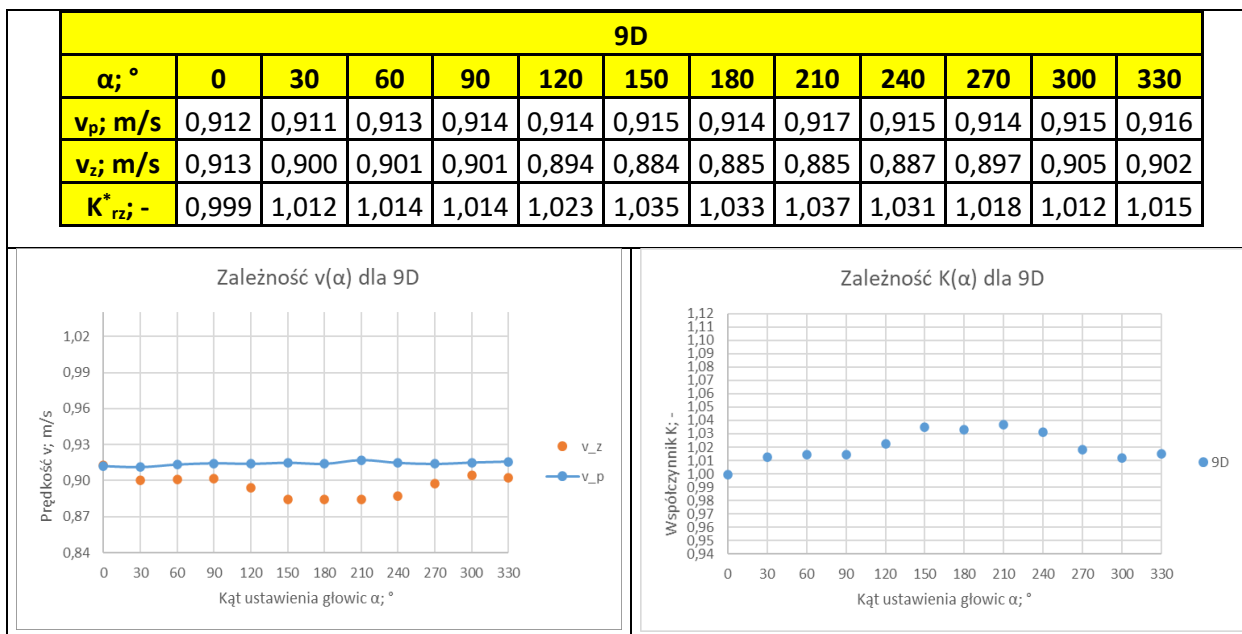


Tabela 6.57. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 10D.

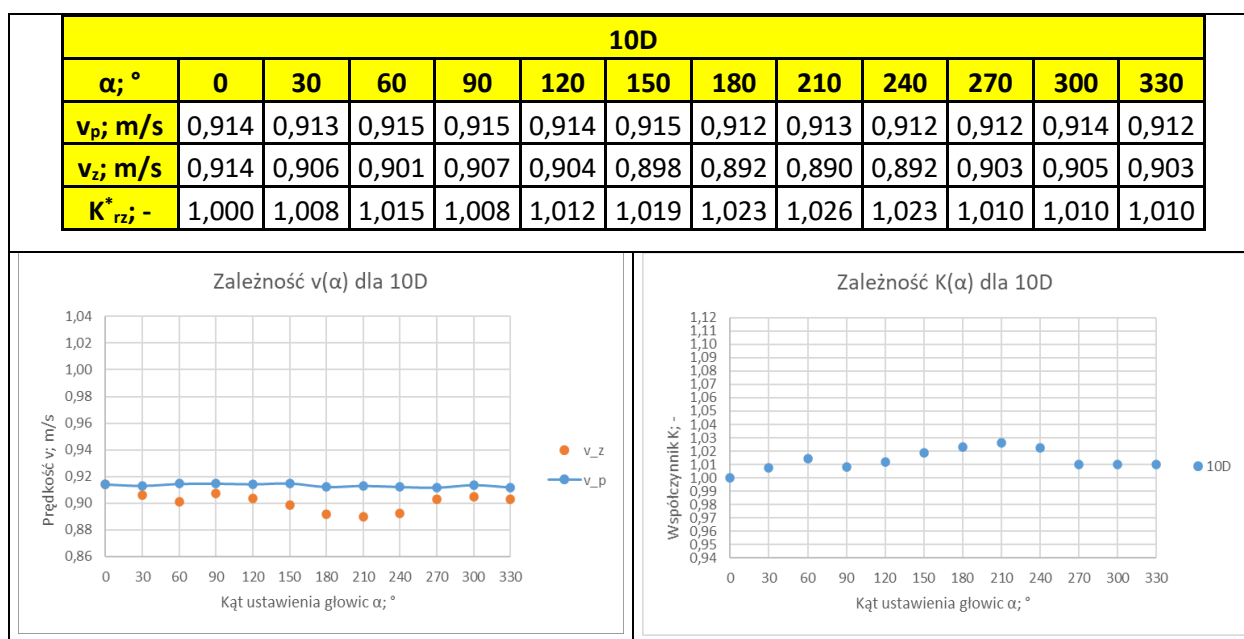


Tabela 6.58. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 12D.

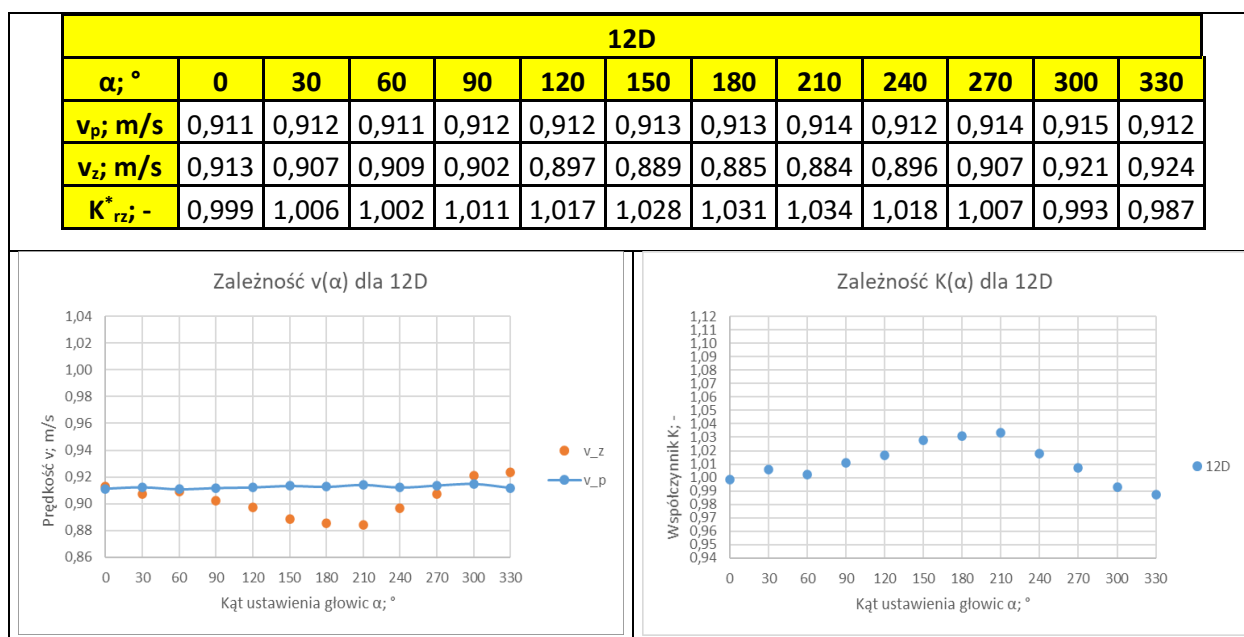
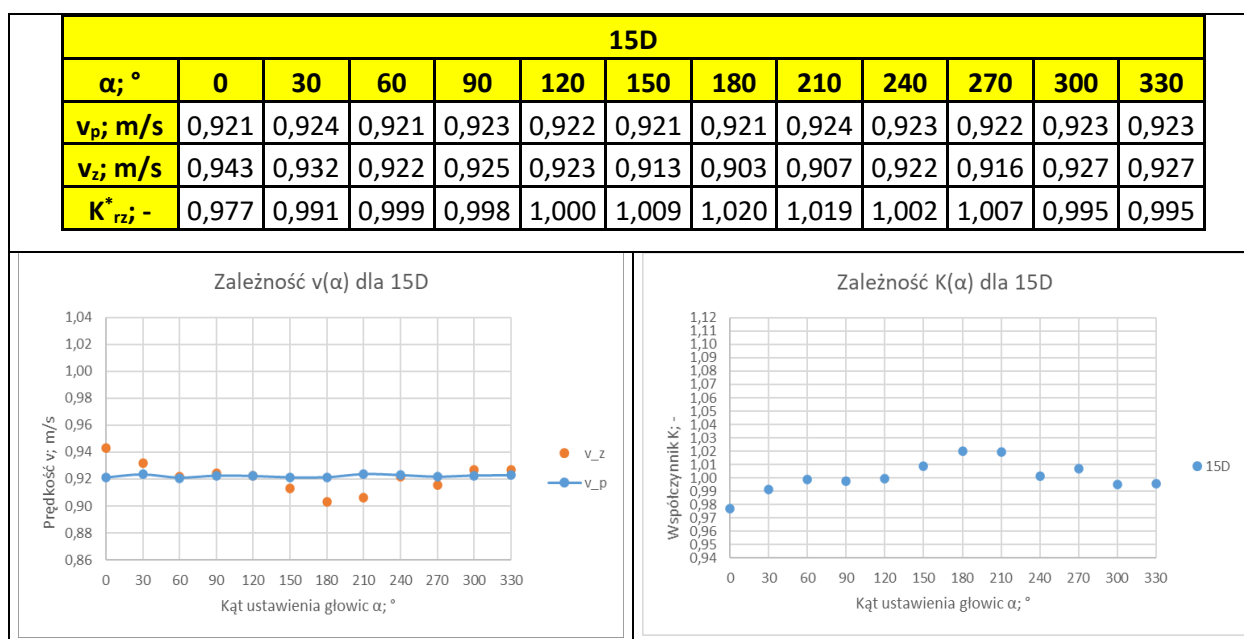


Tabela 6.59. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 15D.

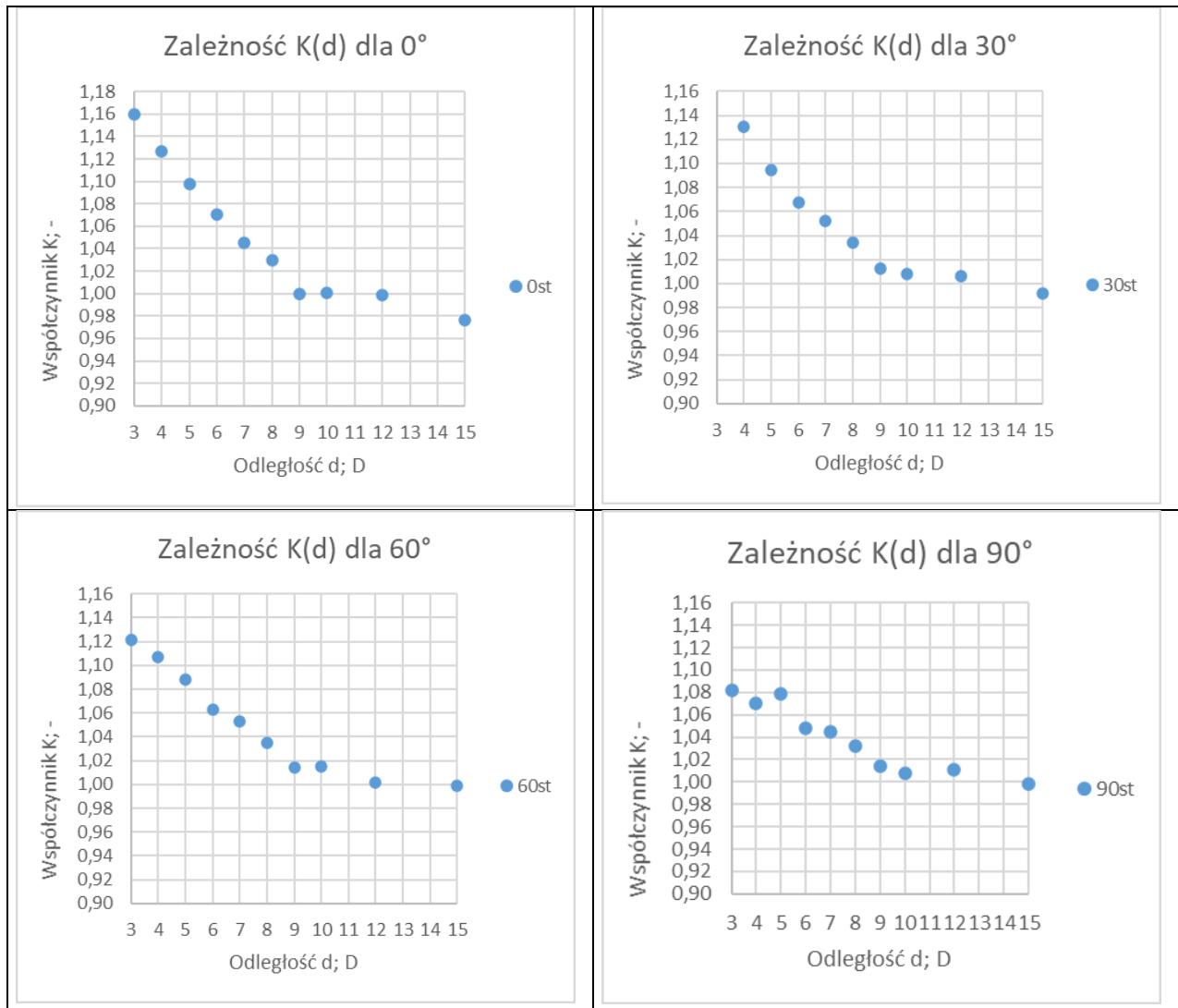


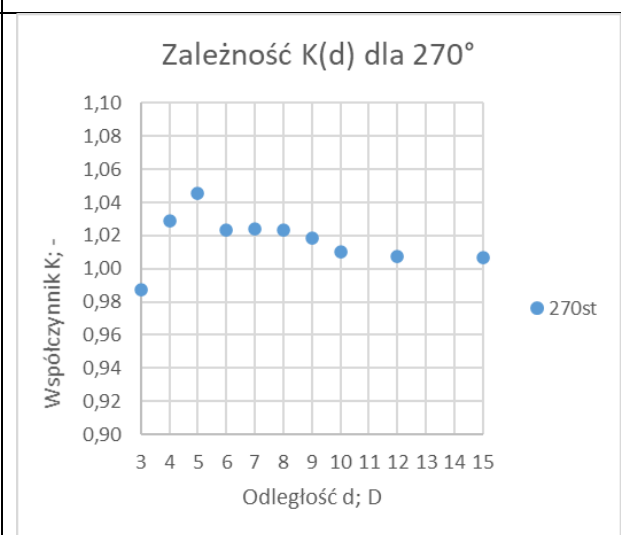
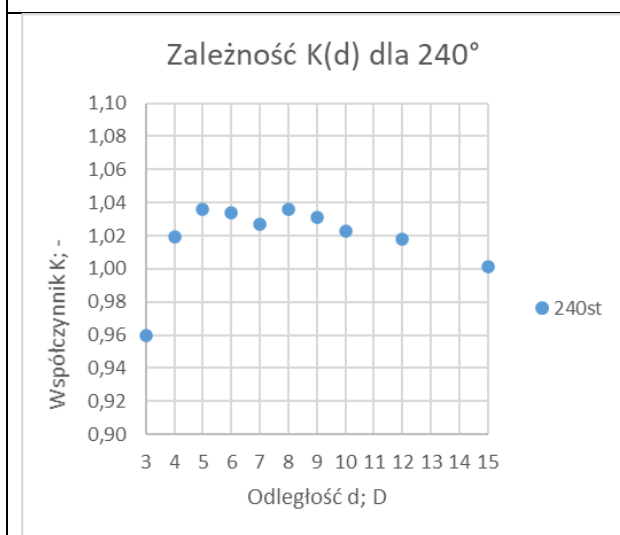
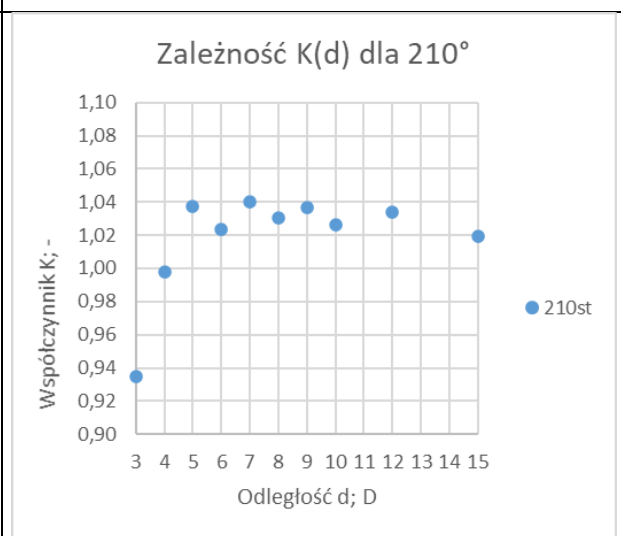
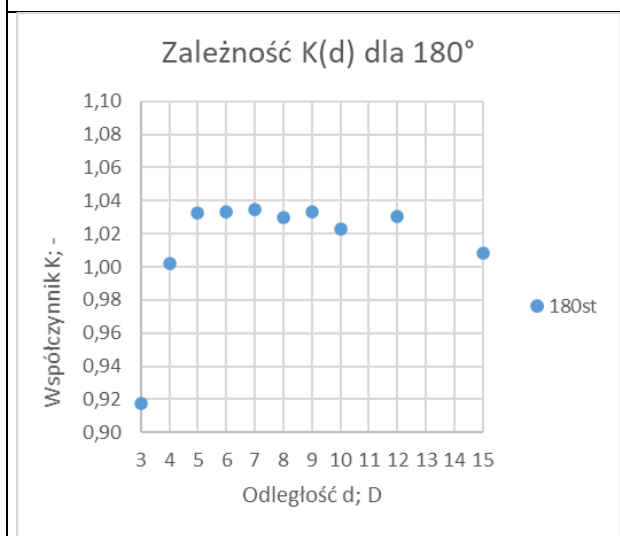
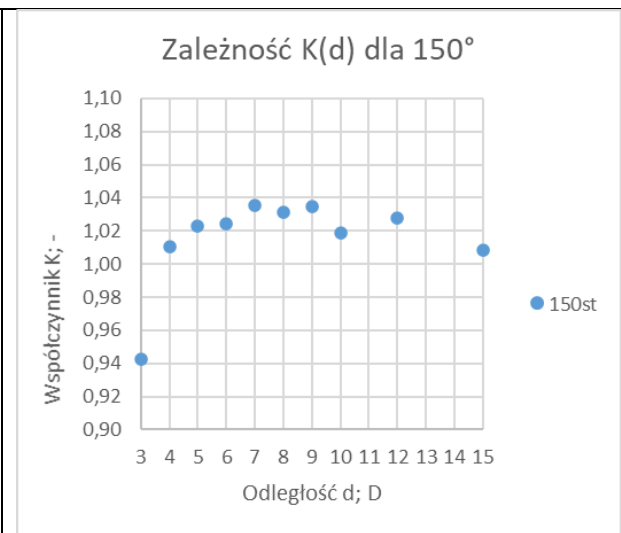
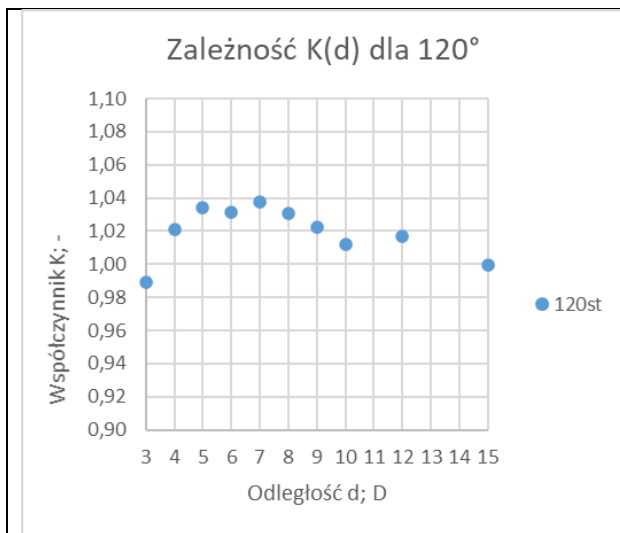
W serii pomiarowej dla ustawienia głowicy typu Z wykonanej dla przymknięcia 1/2 wysokości zasuwy nożowej zauważamy analogiczne trendy jak w przypadku serii dla przymknięcia 1/3 wysokości zasuwy nożowej. Wraz ze wzrostem odległości przekroju pomiarowego od zasuwy zmniejsza się rozrzut wartości  $K_{rz}^*$  w zależności od kąta  $\alpha$ . Rozrzut ten jest jednak wyraźniejszy niż w przypadku 1/3 przymknięcia zasuwy. W przypadku pomiaru wykonanego w pierwszym przekroju pomiarowym, w odległości 3D od zasuwy nożowej zbiór wartości  $K_{rz}^*$  stanowił zakres (0,918 , 1,168). W każdym kolejnym przekroju pomiarowym dysproporcja pomiędzy wartością minimalną i maksymalną  $K_{rz}^*$  zmniejszała się stopniowo. Dla przekroju 5D zbiór wartości stanowił zakres (1,023 , 1,098), dla przekroju 10D (1,000 , 1,026), dla przekroju 12D (0,999 , 1,028), a dla przekroju 15D (0,977 , 1,020). W odróżnieniu od wyników pomiarów wykonanych dla 1/3 przymknięcia zasuwy, tylko w seriach 3D, 4D i 5D możemy zauważyć kwadratowy charakter zależności  $K_{rz}^*(\alpha)$ . W pozostałych przekrojach pomiarowych wartości  $K_{rz}^*$  dla różnych  $\alpha$  są do siebie zbliżone i oscylują wokół wartości średniej w zakresie  $\pm$  błęd pomiarowego przepływomierza. Dla przekrojów pomiarowych 3D – 5D największe wartości  $K_{rz}^*$  występują dla skrajnych wartości kąta  $\alpha = 0^\circ$  i  $330^\circ$ . W kolejnych przekrojach dysproporcje między wartościami  $K_{rz}^*$  dla  $\alpha = 0^\circ$  i  $330^\circ$ , a wartościami dla pozostałych kątów są znacznie mniejsze i wartości te dążą do wyrównania.

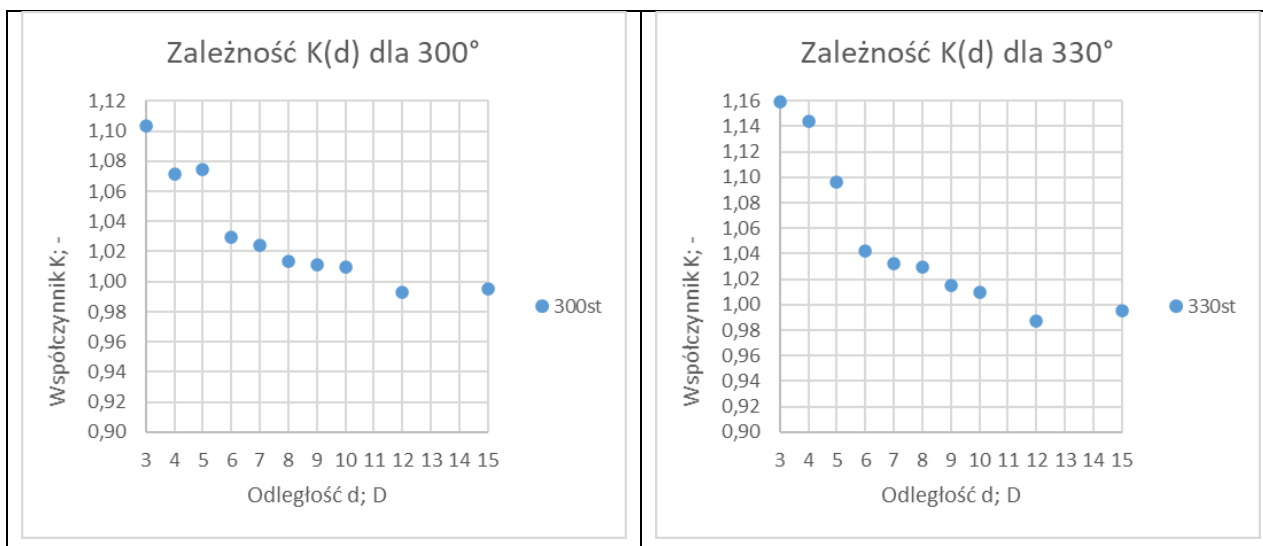
Przebieg zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  różni się od przebiegu tej zależności dla pomiarów wykonanych dla 1/3 zamknięcia zasuwy. Dla wszystkich kątów  $\alpha$  widoczne jest wyraźne wyrównanie się prędkości  $v_p$  i  $v_z$  wraz ze wzrostem odległości przekroju pomiarowego od zasuwy, co objawia się w zbliżaniu się wartości współczynnika  $K_{rz}^*$  do wartości  $=1 \pm$  błąd pomiarowy przepływomierza. Największa różnica między maksymalną i minimalną wartością  $K_{rz}^*$  występuje dla wspomnianych wcześniej kątów  $\alpha = 0^\circ$  i  $330^\circ$ , podobnie zresztą jak dla pomiarów wykonanych dla 1/3 zamknięcia zasuwy. W przypadku kątów  $\alpha$  z zakresu  $0^\circ - 60^\circ$  dążenie do wartości  $K_{rz}^* = 1$  w zakresie przekrojów pomiarowych 3D – 9D można opisać zależnością liniową, a w kolejnych przekrojach wartość  $K_{rz}^*$  ulega stabilizacji (na w przybliżeniu stałym poziomie). Dla kątów  $\alpha$  w zakresie  $90^\circ - 270^\circ$  dokonywania pomiarów wartości  $K_{rz}^*$  szybciej zbiegają do wartości  $K_{rz}^* = 1 \pm$  błąd pomiarowy przepływomierza – dla większości z kątów osiągnięcie tego przedziału ma miejsce już dla

przekroju pomiarowego 6D. Wykresy dla kątów  $\alpha$  równych  $300^\circ$  i  $330^\circ$  wykazują podobny przebieg zależności jak dla kątów  $\alpha$  z zakresu  $0^\circ - 60^\circ$

Tabela 6.60. Graficzna prezentacja zależności  $K^*_{rz}(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ - 330^\circ$ , dla 1/2 wysokości zamknięcia zasowy nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu Z przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$ .







### 6.2.2 Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 35\ 000$ i układzie głowic V

Poniżej w rozdziale 6.2.2 zamieszczono wyniki pomiarów i obliczeń dla serii pomiarowej wykonanej przy zamknięciu 1/2 wysokości zasowy nożowej, przy liczbie Reynoldsa przepływu  $Re \approx 35\ 000$  i ustawieniu głowic przepływomierza ultradźwiękowego typu V. W tabelach 6.61-6.71 zostały umieszczone wykresy stworzone na podstawie danych pomiarowych oraz rezultatów obliczeń.

Tabela 6.61. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 3D.

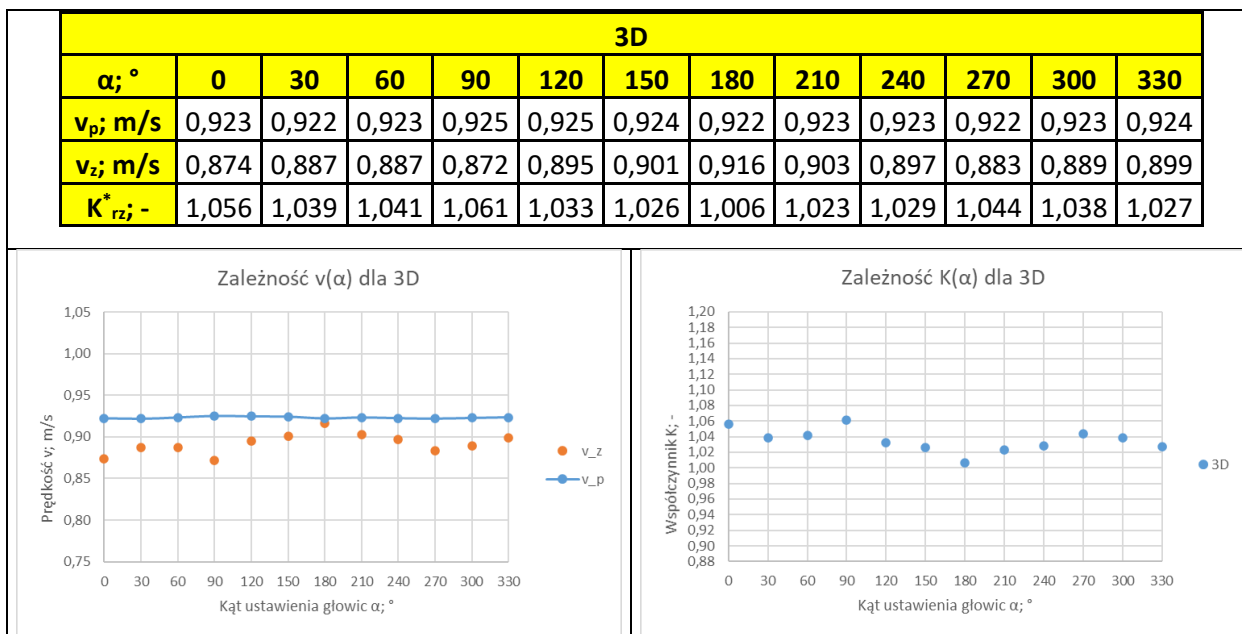


Tabela 6.62. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 4D.

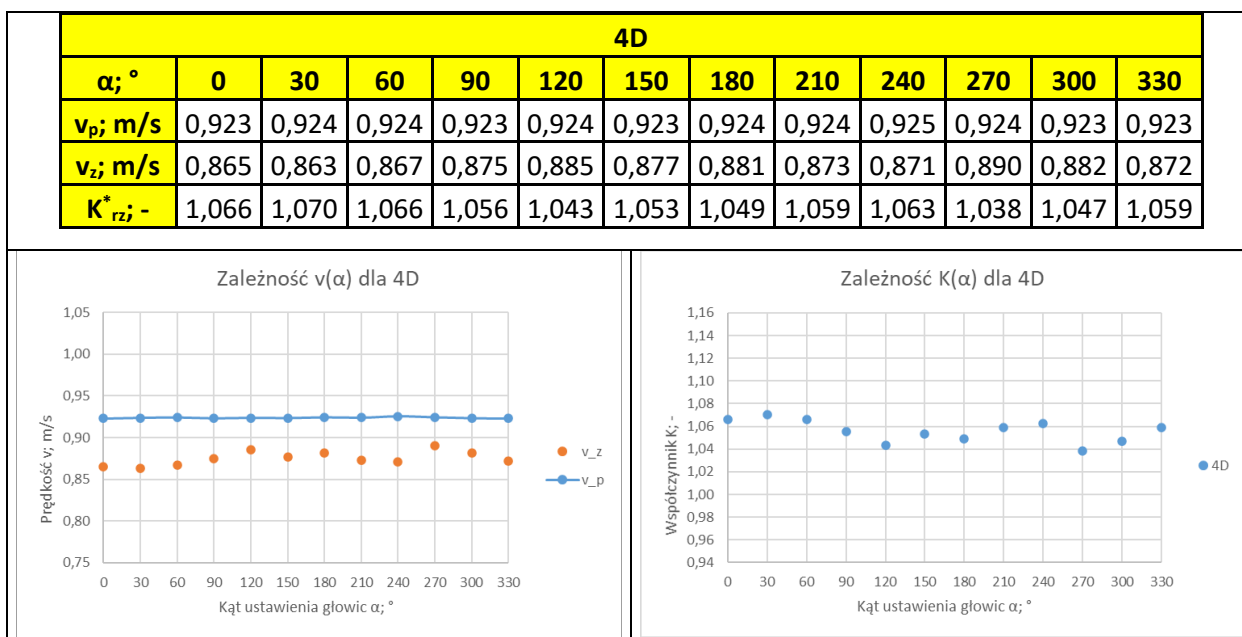


Tabela 6.63. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 5D.

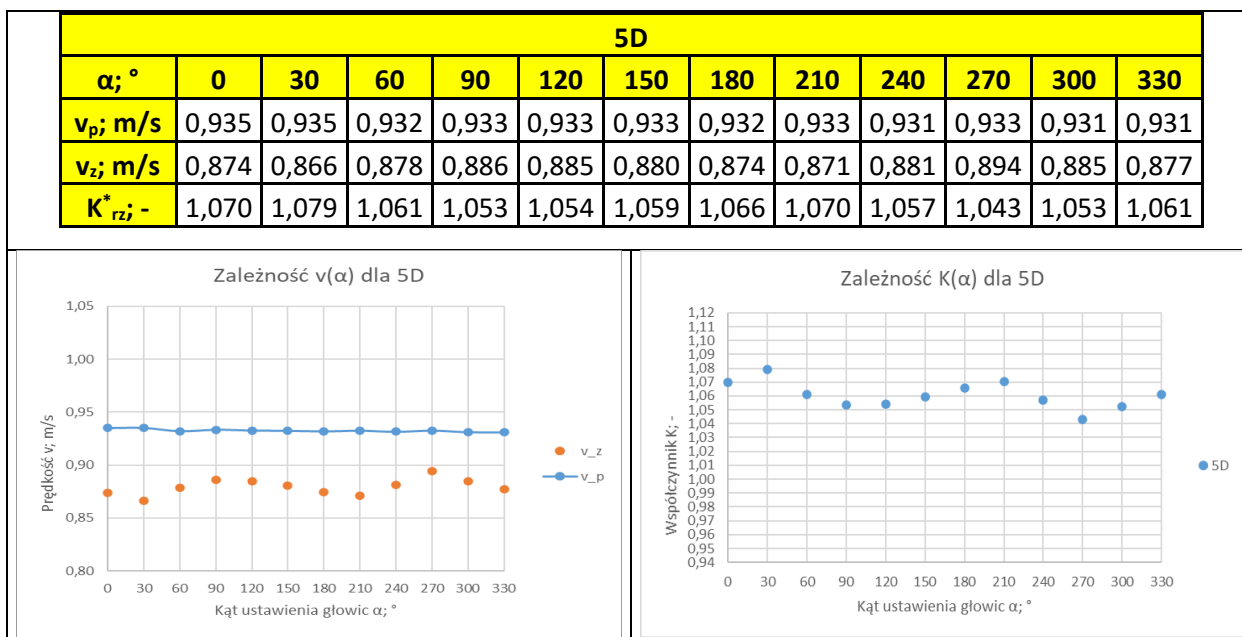




Tabela 6.64. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 6D.

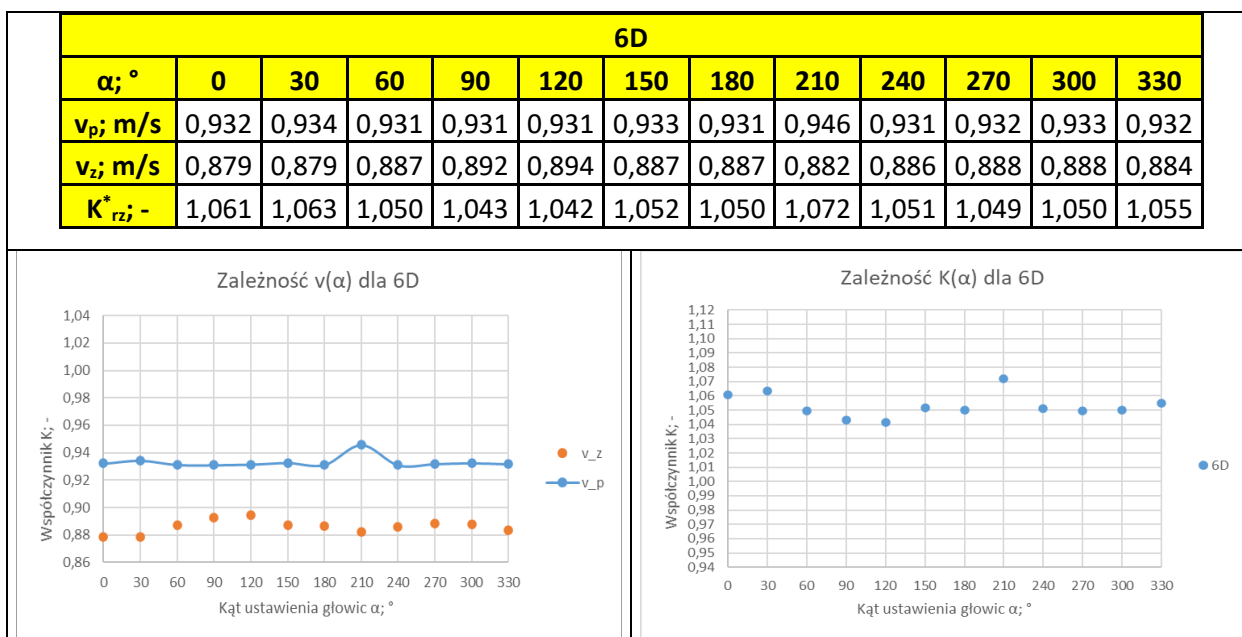


Tabela 6.65. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 7D.

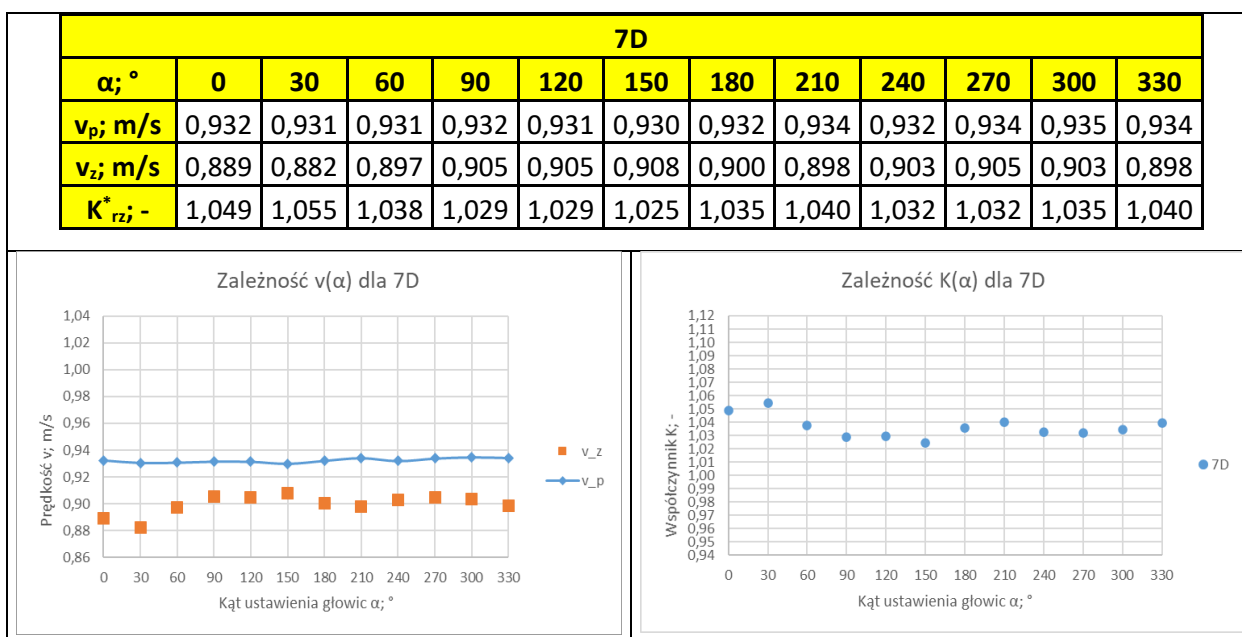


Tabela 6.66. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 8D.

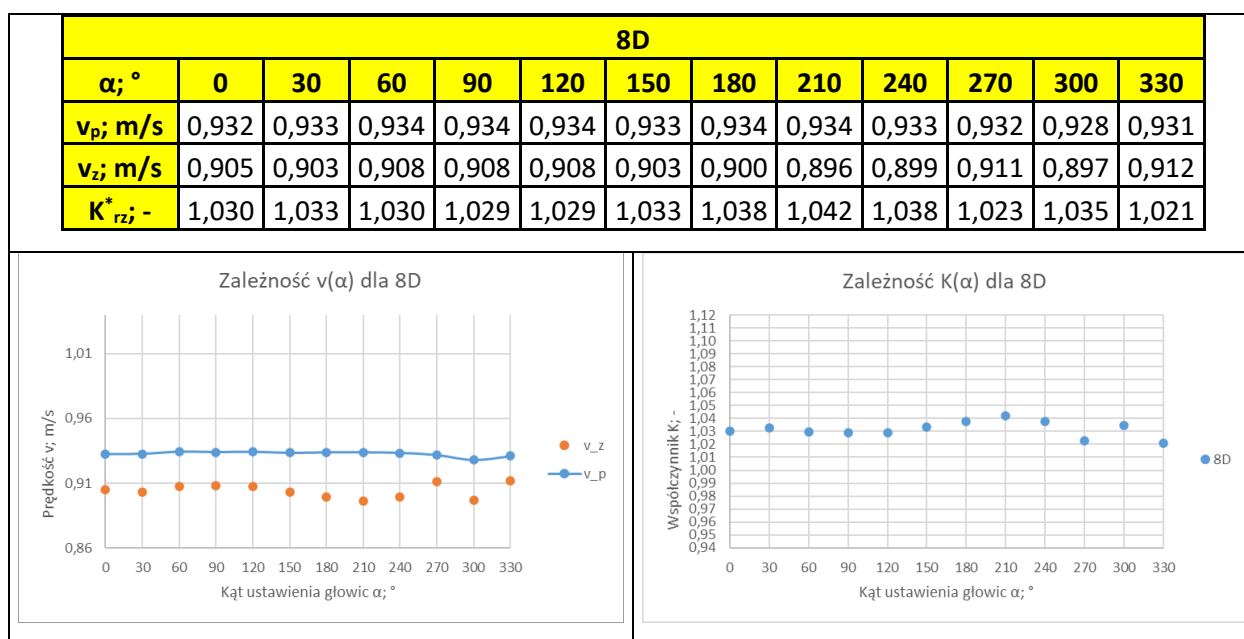


Tabela 6.67. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 9D.

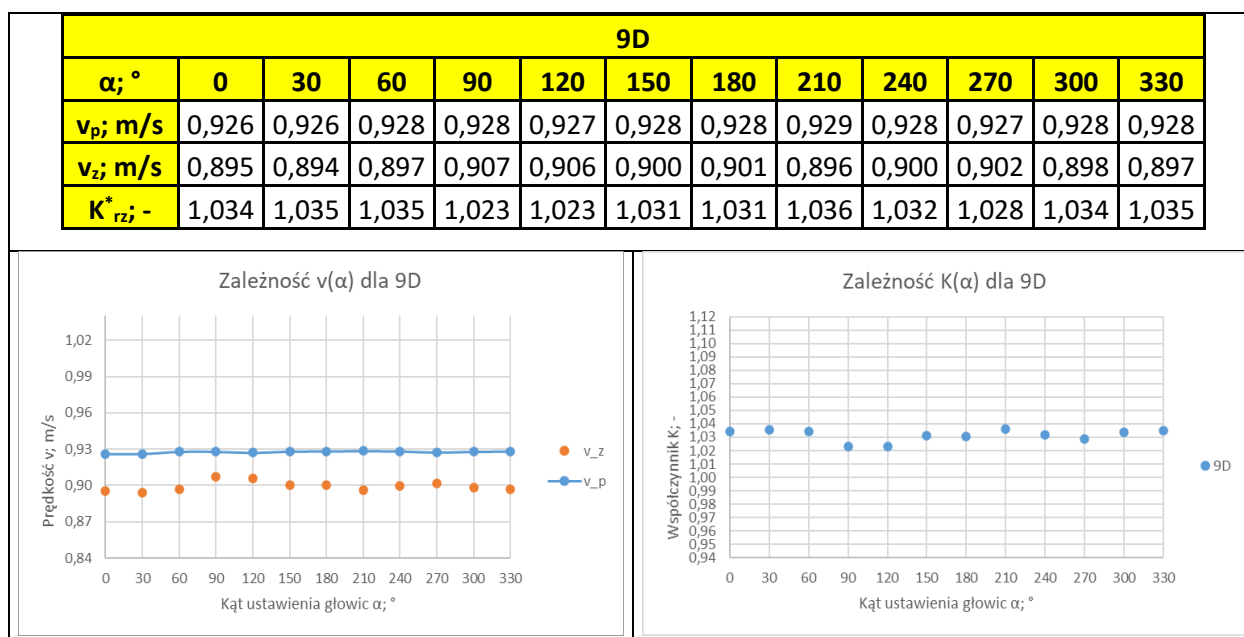


Tabela 6.68. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 10D.

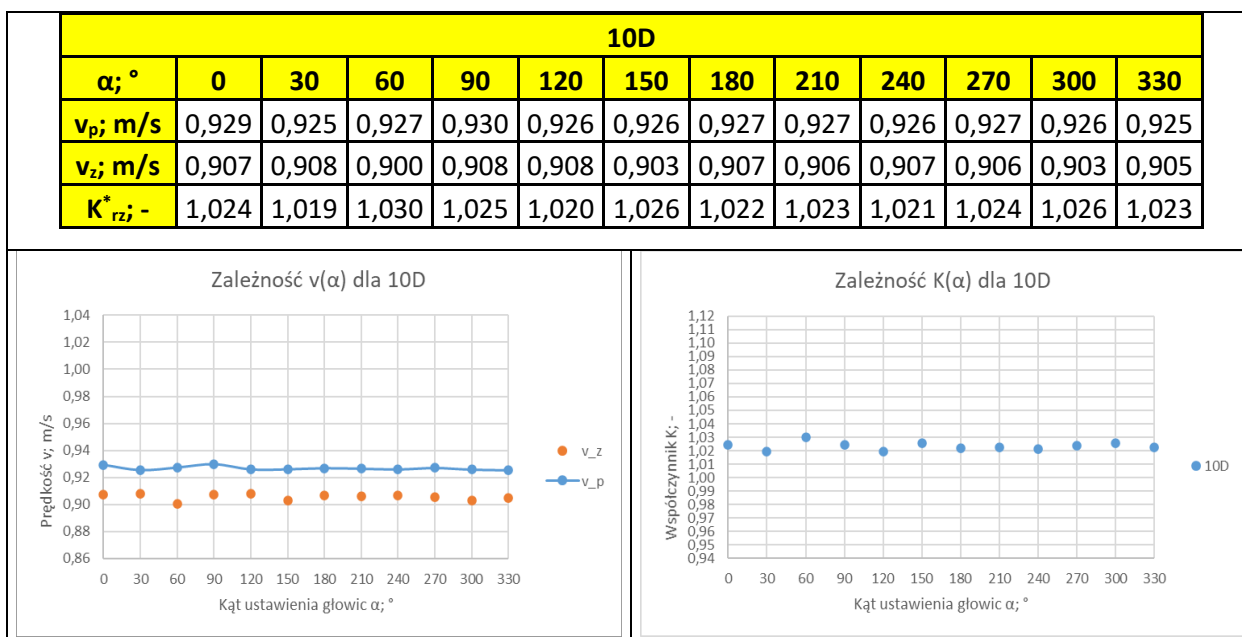


Tabela 6.69. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 12D.

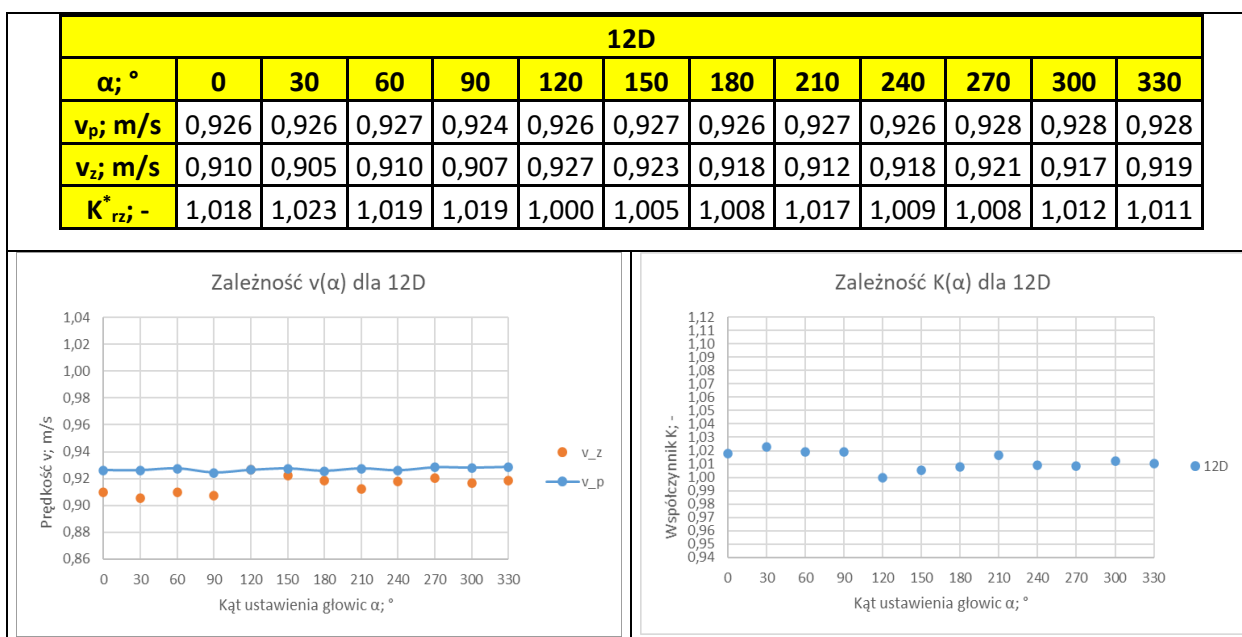
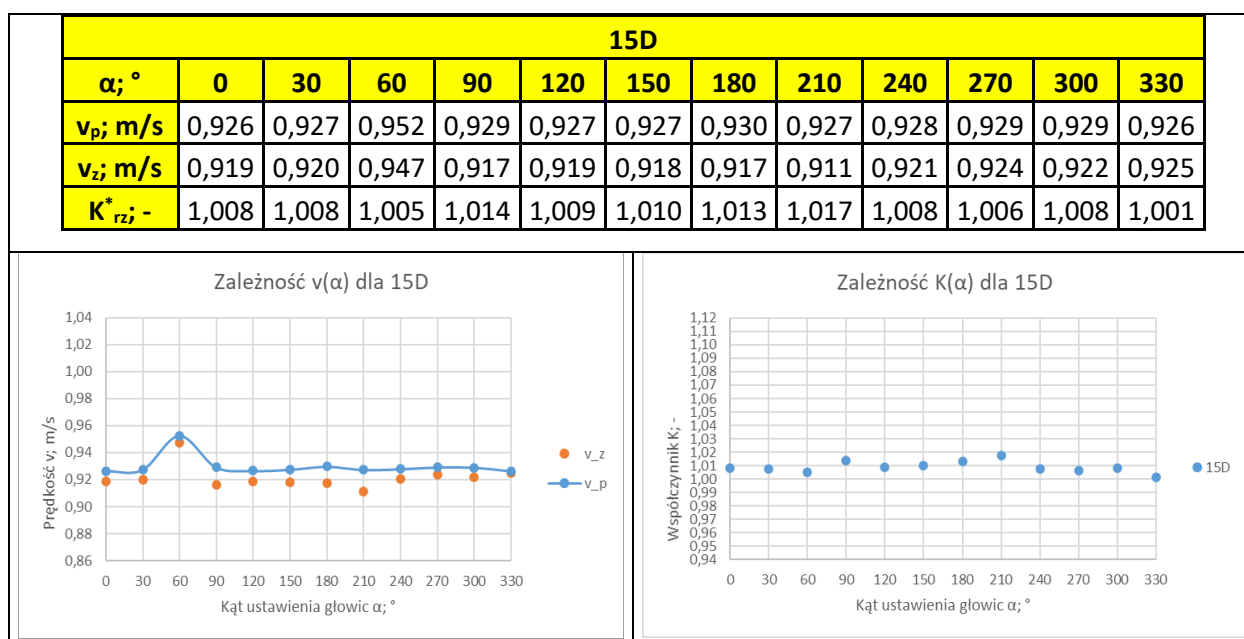


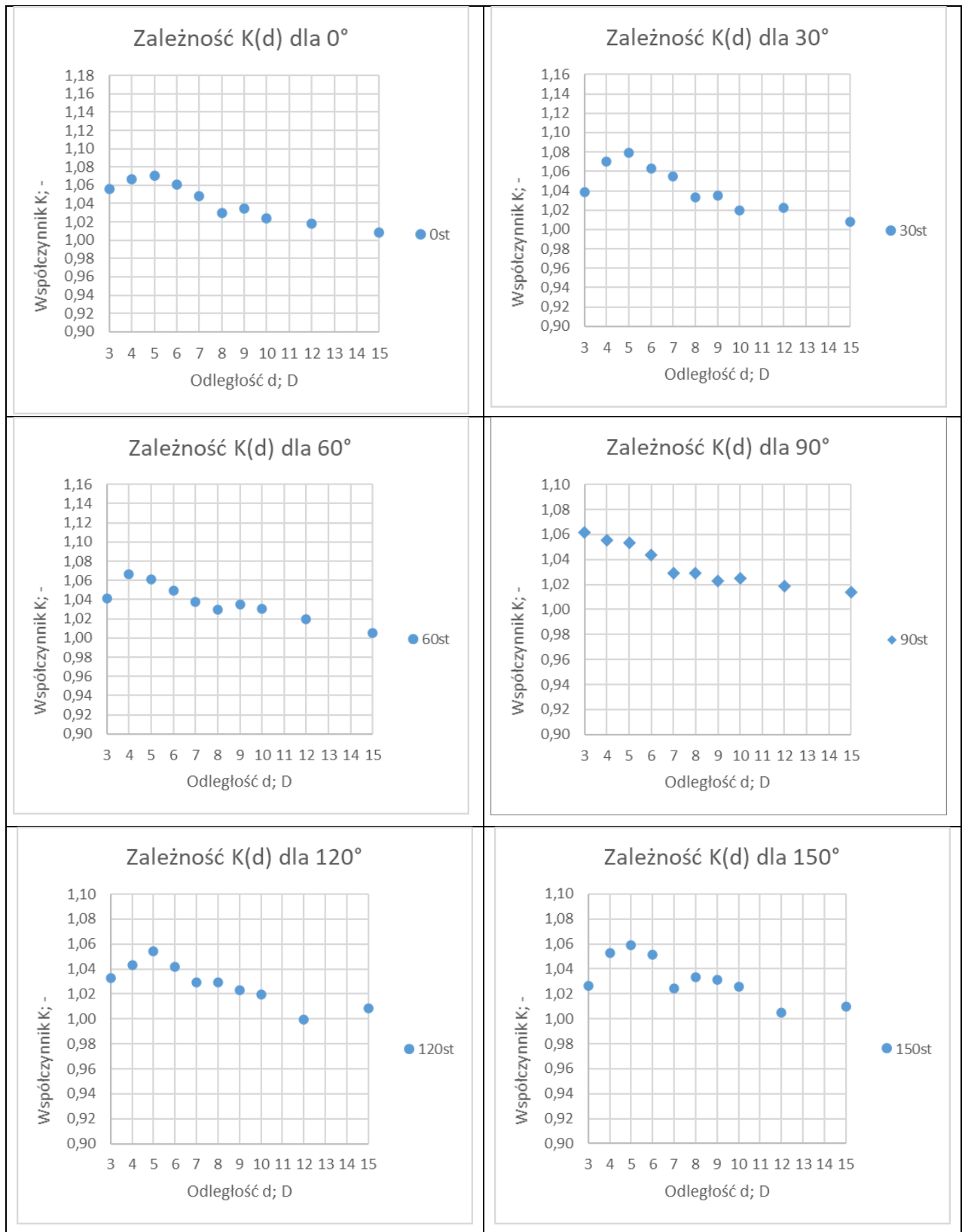
Tabela 6.70. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 15D.

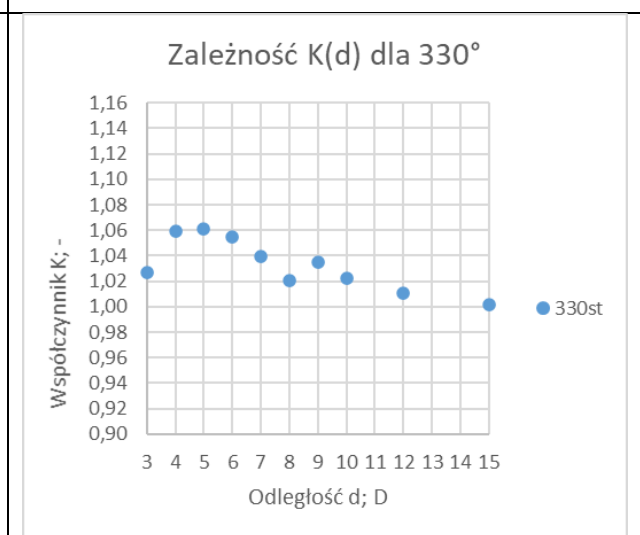
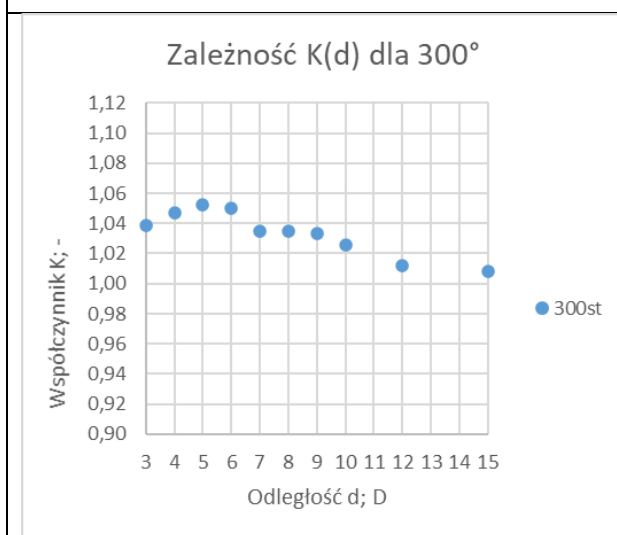
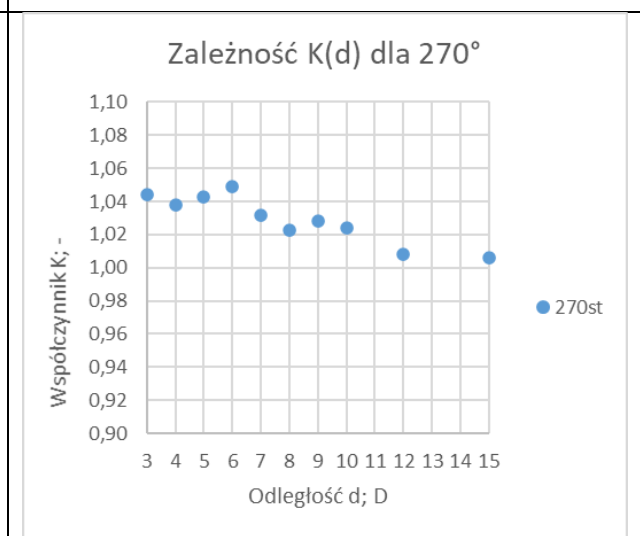
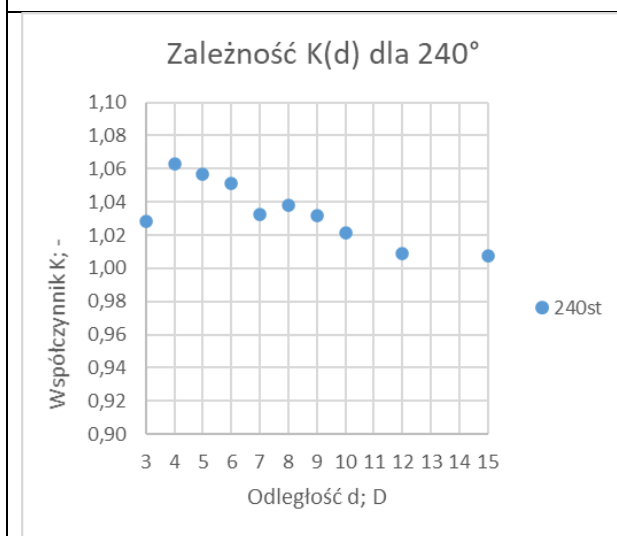
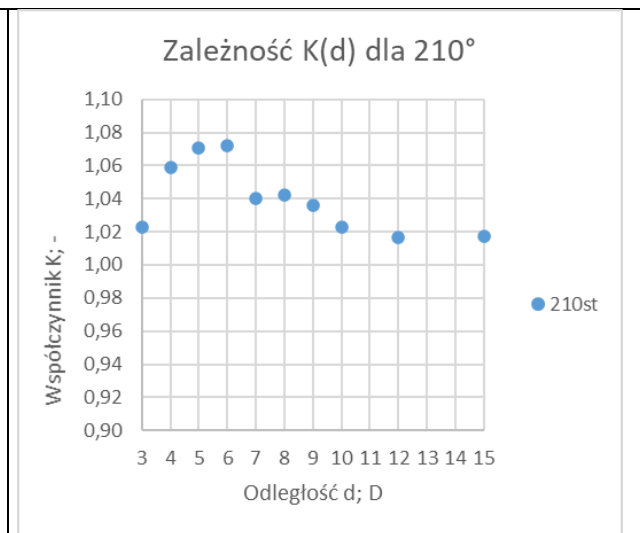
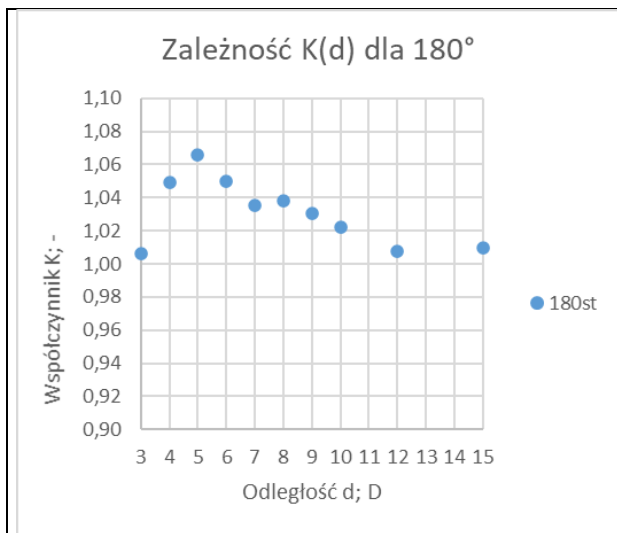


Podobnie jak dla pomiarów wykonanych dla 1/3 przymknięcia zasuwy nożowej, w przebiegu zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla ustawienia głowic ultradźwiękowych typu V przy 1/2 przymknięcia zasuwy widzimy zasadnicze różnice w porównaniu z przebiegiem zależności  $K_{rz}^*(\alpha)$  dla ustawienia głowic typu Z. W układzie typu V, z podwójnym przejściem fali ultradźwiękowej, różnice pomiędzy minimalną i maksymalną wartością  $K_{rz}^*(\alpha)$  dla poszczególnych kątów  $\alpha$  są wyraźnie mniejsze. Wraz ze zwiększeniem odległości przekroju pomiarowego od zasuwy przebieg zależności ulega nieznacznemu spłaszczeniu. Rozrzut wartości  $K_{rz}^*$  w zależności od kąta  $\alpha$  jest znacznie mniejszy niż w przypadku pomiarów wykonanych w ustawieniu głowic typu Z. W przypadku pomiaru wykonanego przekroju pomiarowym 3D zbiór wartości  $K_{rz}^*$  stanowił zakres (1,023 , 1,056), dla przekroju 5D zbiór wartości stanowił zakres (1,043 , 1,079), dla przekroju 10D (1,019 , 1,030), dla przekroju 10D (1,000 , 1,023), a dla przekroju 15D (1,001 , 1,017). Widoczne jest więc, że pomiary prędkości wykonywane przy użyciu przepływomierza ultradźwiękowego w układzie głowic typu V są znacznie mniej zależne od wpływu zaburzeń przepływu niż pomiary wykonywane dla układu głowic typu Z i wybór kąta  $\alpha$  ustawienia głowic w układzie typu V ma znacznie mniejsze znaczenie niż w układzie typu Z.

Opisany powyżej przebieg zależności  $K_{rz}^*(\alpha)$  potwierdzają zamieszczone poniżej wykresy zależności wartości  $K_{rz}^*$  od odległości przekroju pomiarowego dla poszczególnych kątów. Dla wszystkich kątów  $\alpha$  widoczne jest wyrównanie się prędkości  $v_p$  i  $v_z$  wraz ze wzrostem odległości przekroju pomiarowego od zasuwy, co objawia się w zbliżaniu się wartości współczynnika  $K_{rz}^*$  do wartości  $= 1 \pm$  błąd pomiarowy przepływomierza. Zauważalne jest, że w przekroju pomiarowym 3D znajdującym się najbliżej zasuwy wartość  $K_{rz}^*$  nie mieści się w zakresie  $1 \pm$  błąd pomiarowy przepływomierza, jak miało to miejsce w przypadku pomiarów wykonanych dla 1/3 zamknięcia zasuwy. Jest to spowodowane większym zaburzeniem przepływu spowodowanym większym stopniem przymknięcia zasuwy. Dla większości kątów maksymalna wartość  $K_{rz}^*$  jest osiągnięta w przekrojach 4D - 6D, a w kolejnych przekrojach wartość  $K_{rz}^*$  zaczyna stabilizować się wokół wartości  $K_{rz}^*=1$ , w granicach  $\pm$  błędu pomiarowego przepływomierza.

Tabela 6.71. Graficzna prezentacja zależności  $K^*_{rz}(a,d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla 1/2 wysokości zamknięcia zasuw nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu V przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$ .



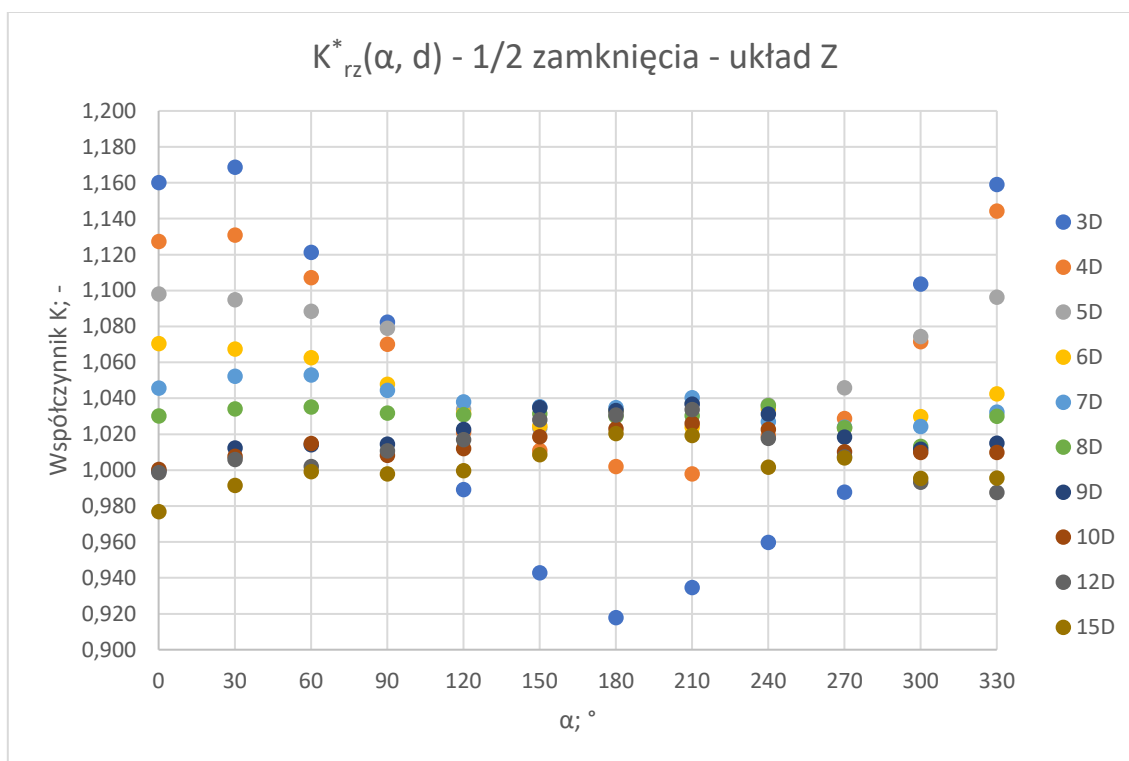


### 6.2.3 Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 35\,000$ – podsumowanie

W rozdziale 6.2.3 zamieszone zostały zbiorcze wyniki pomiarów wykonanych przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw nożowej, przy liczbie Reynoldsa przepływu  $Re \approx 35\,000$  dla ustawień głowic ultradźwiękowych typu Z i typu V. Stworzone wykresy zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  rys. 6.5 i rys. 6.6 pozwalają na porównanie rezultatów badań dla obu ustawień głowic ultradźwiękowych.

Tabela 6.72. Zbiorcze zestawienie zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla 1/2 wysokości zamknięcia zasuw nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu Z przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\,000$ .

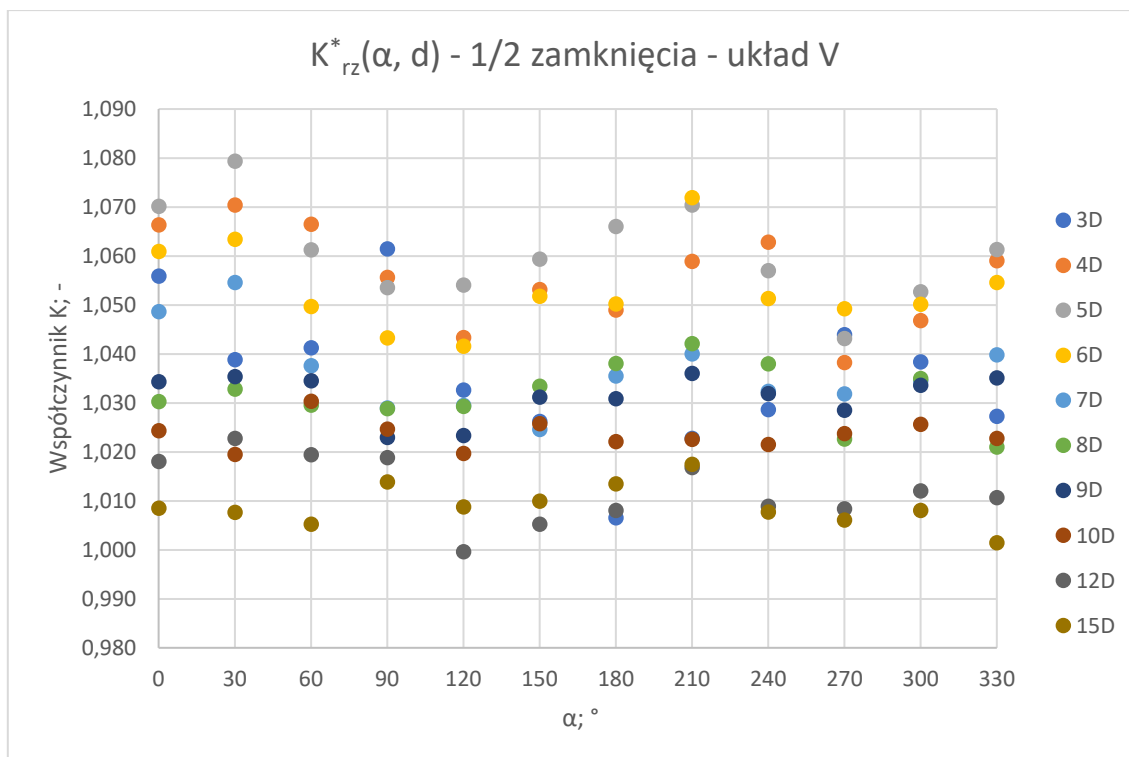
Re≈35 000 - układ Z												
$\alpha; ^\circ$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
3D	1,160	1,168	1,121	1,082	0,989	0,943	0,918	0,934	0,960	0,988	1,104	1,159
4D	1,127	1,131	1,107	1,070	1,021	1,011	1,002	0,998	1,019	1,029	1,071	1,144
5D	1,098	1,095	1,088	1,079	1,034	1,023	1,033	1,037	1,036	1,046	1,074	1,096
6D	1,070	1,067	1,062	1,048	1,031	1,025	1,033	1,024	1,034	1,023	1,030	1,042
7D	1,046	1,052	1,053	1,044	1,038	1,035	1,035	1,040	1,027	1,024	1,024	1,032
8D	1,030	1,034	1,035	1,032	1,031	1,031	1,030	1,030	1,036	1,023	1,013	1,030
9D	0,999	1,012	1,014	1,014	1,023	1,035	1,033	1,037	1,031	1,018	1,012	1,015
10D	1,000	1,008	1,015	1,008	1,012	1,019	1,023	1,026	1,023	1,010	1,010	1,010
12D	0,999	1,006	1,002	1,011	1,017	1,028	1,031	1,034	1,018	1,007	0,993	0,987
15D	0,977	0,991	0,999	0,998	1,000	1,009	1,020	1,019	1,002	1,007	0,995	0,995



Rys. 6.5. Wykres zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla 1/2 wysokości zamknięcia zasuw nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu Z przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\,000$ .

Tabela 6.73. Zbiorcze zestawienie zależności  $K^*_{rz}(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla 1/2 wysokości zamknięcia zasowy nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu V przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$ .

Re=35 000 - układ V												
$\alpha; ^\circ$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
3D	1,056	1,039	1,041	1,061	1,033	1,026	1,006	1,023	1,029	1,044	1,038	1,027
4D	1,066	1,070	1,066	1,056	1,043	1,053	1,049	1,059	1,063	1,038	1,047	1,059
5D	1,070	1,079	1,061	1,053	1,054	1,059	1,066	1,070	1,057	1,043	1,053	1,061
6D	1,061	1,063	1,050	1,043	1,042	1,052	1,050	1,072	1,051	1,049	1,050	1,055
7D	1,049	1,055	1,038	1,029	1,029	1,025	1,035	1,040	1,032	1,032	1,035	1,040
8D	1,030	1,033	1,030	1,029	1,029	1,033	1,038	1,042	1,038	1,023	1,035	1,021
9D	1,034	1,035	1,035	1,023	1,023	1,031	1,031	1,036	1,032	1,028	1,034	1,035
10D	1,024	1,019	1,030	1,025	1,020	1,026	1,022	1,023	1,021	1,024	1,026	1,023
12D	1,018	1,023	1,019	1,019	1,000	1,005	1,008	1,017	1,009	1,008	1,012	1,011
15D	1,008	1,008	1,005	1,014	1,009	1,010	1,013	1,017	1,008	1,006	1,008	1,001



Rys. 6.6. Wykres zależności  $K^*_{rz}(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla 1/2 wysokości zamknięcia zasowy nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu V przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$ .



#### 6.2.4 Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 70\,000$ i układzie głowic Z

Poniżej w rozdziale 6.2.4 zamieszczono wyniki pomiarów i obliczeń dla serii pomiarowej wykonanej przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw nożowej, przy liczbie Reynoldsa przepływu  $Re \approx 70\,000$  i ustawieniu głowic przepływomierza ultradźwiękowego typu Z. W tabelach 6.74 - 6.84 zostały umieszczone wykresy stworzone na podstawie danych pomiarowych oraz rezultatów obliczeń.

Tabela 6.74. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 3D.

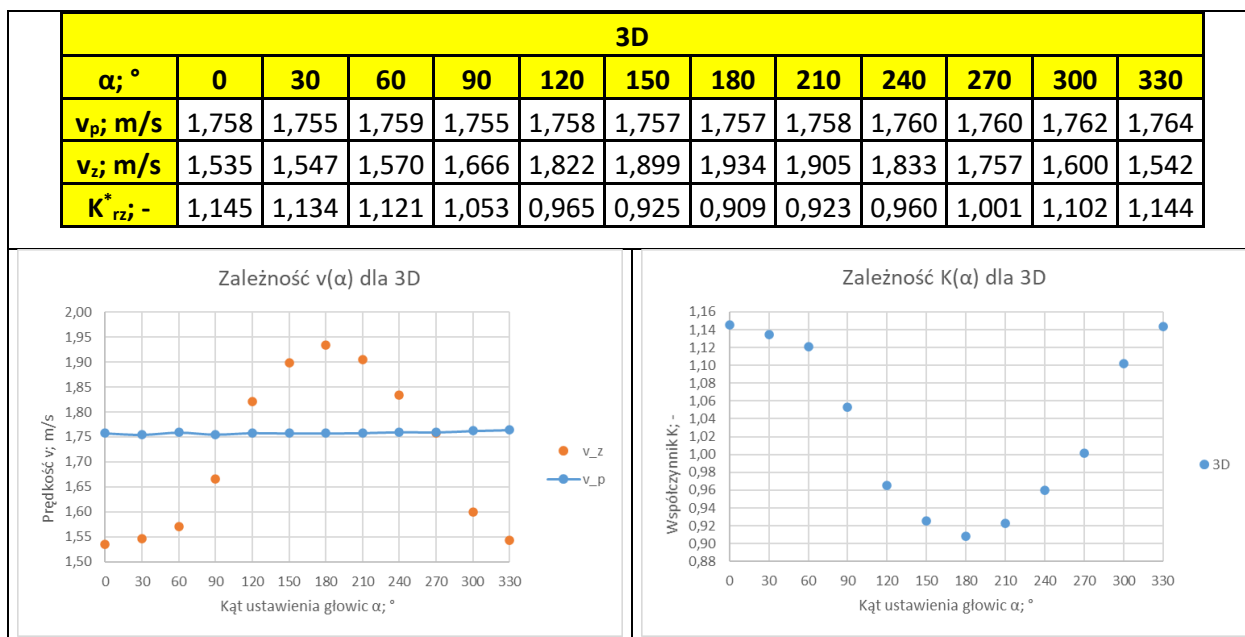


Tabela 6.75. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 4D.

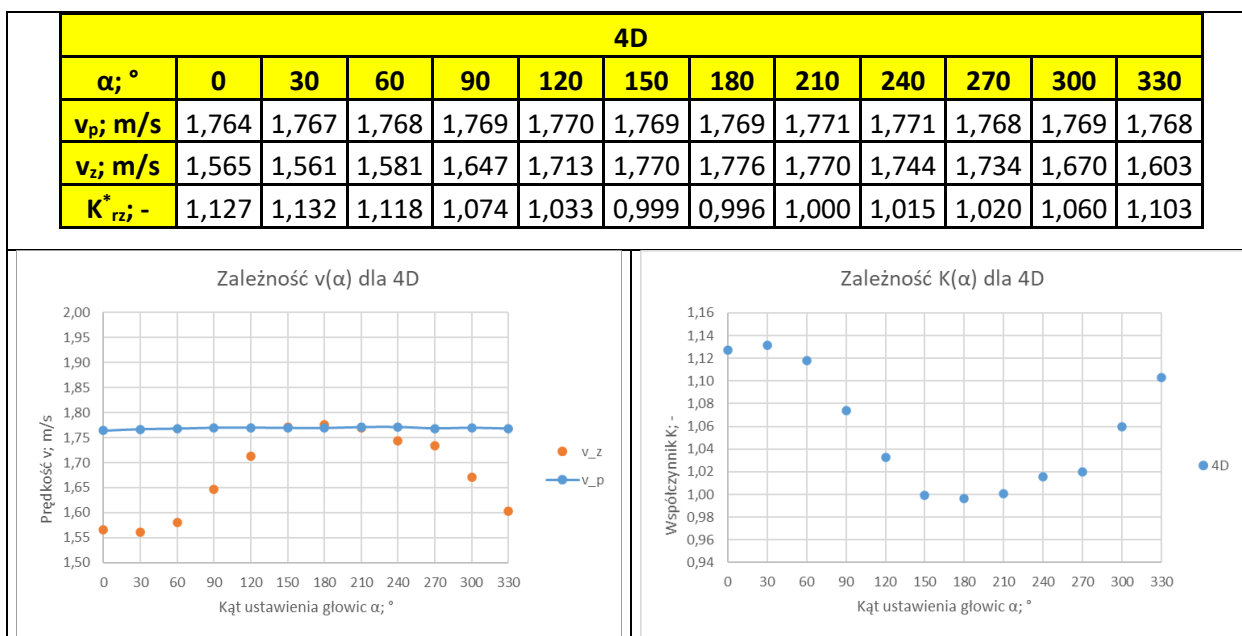


Tabela 6.76. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 5D.

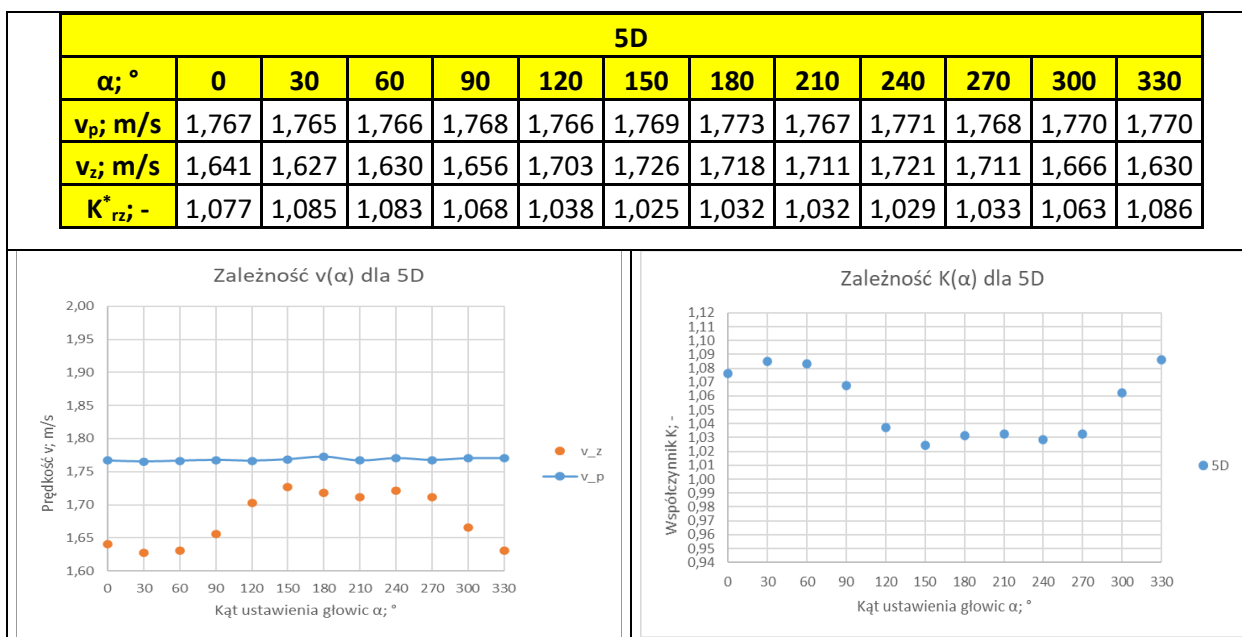


Tabela 6.77. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 6D.

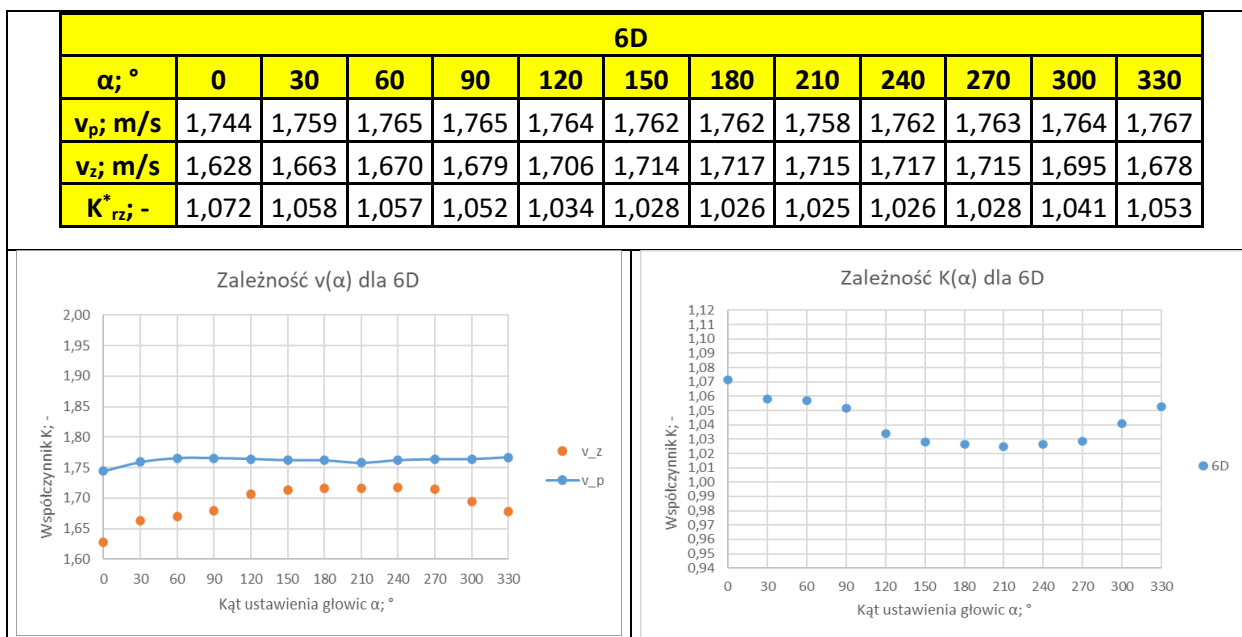


Tabela 6.78. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 7D.

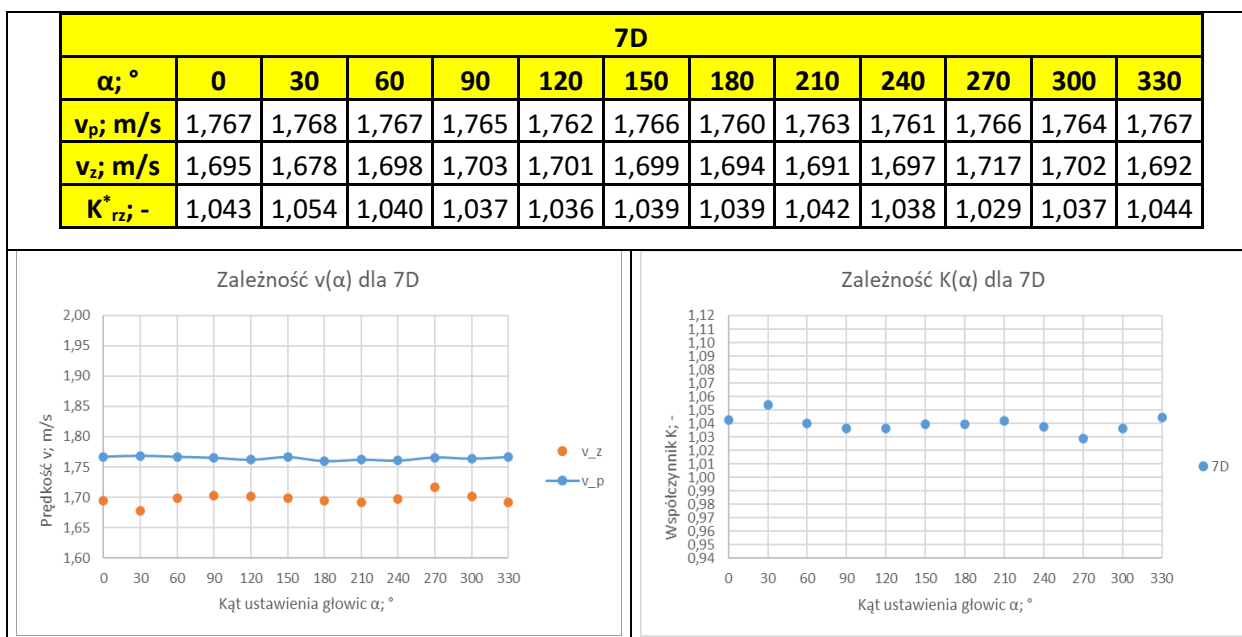


Tabela 6.79. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 8D.

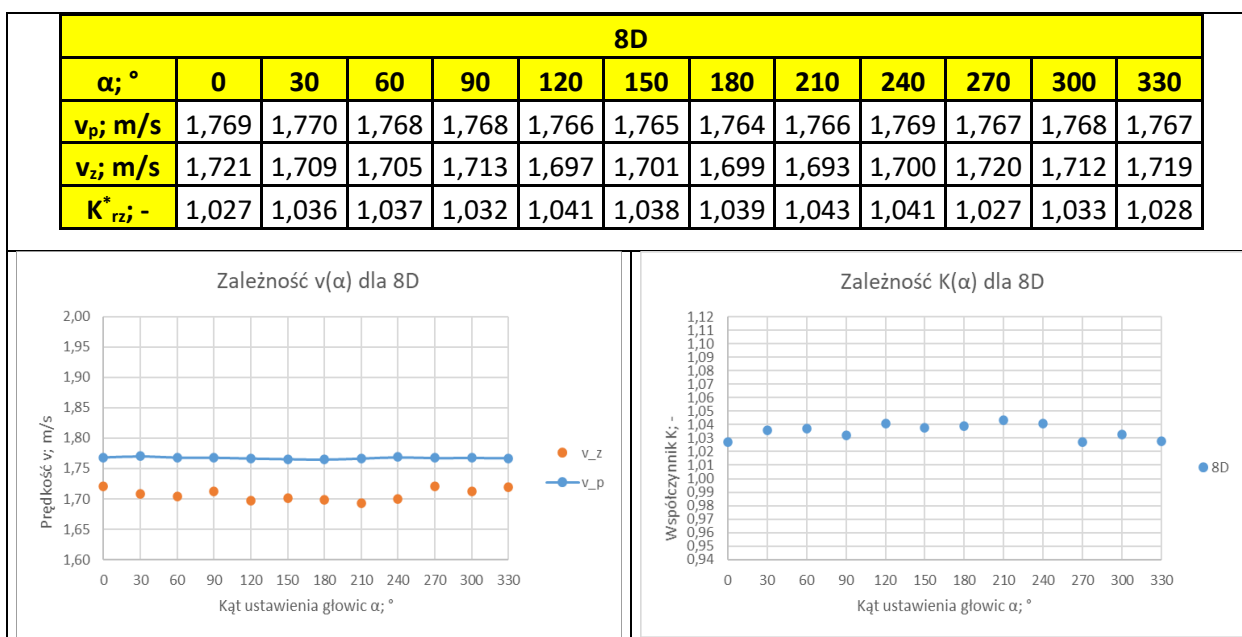


Tabela 6.80. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 9D.

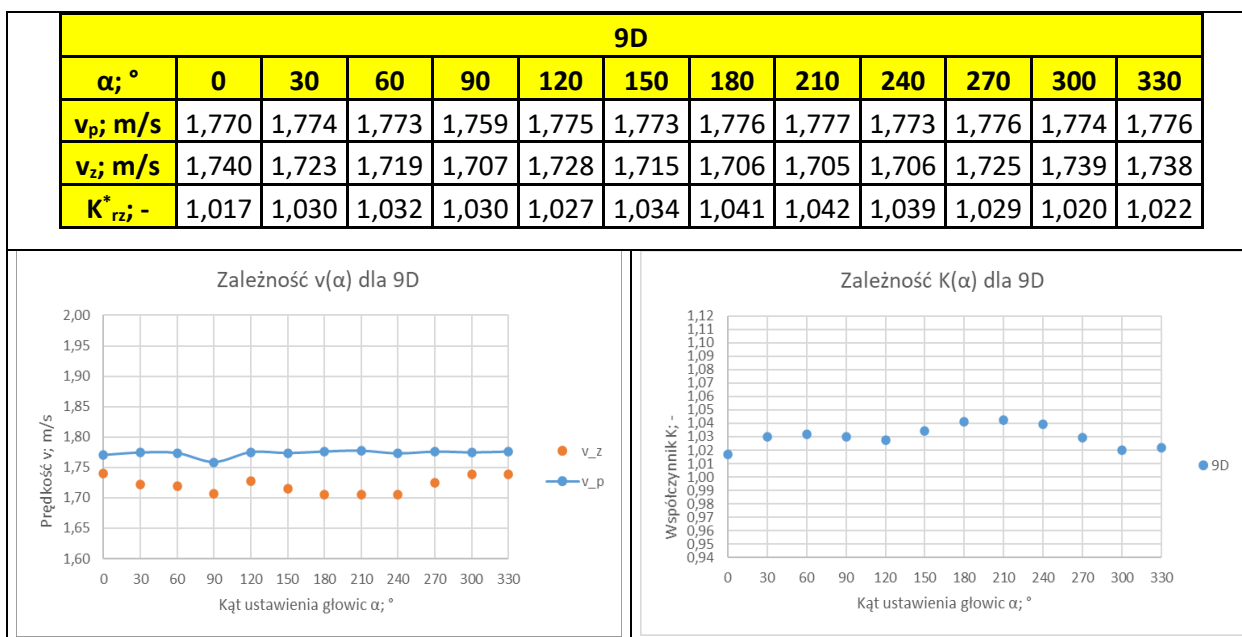


Tabela 6.81. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 10D.

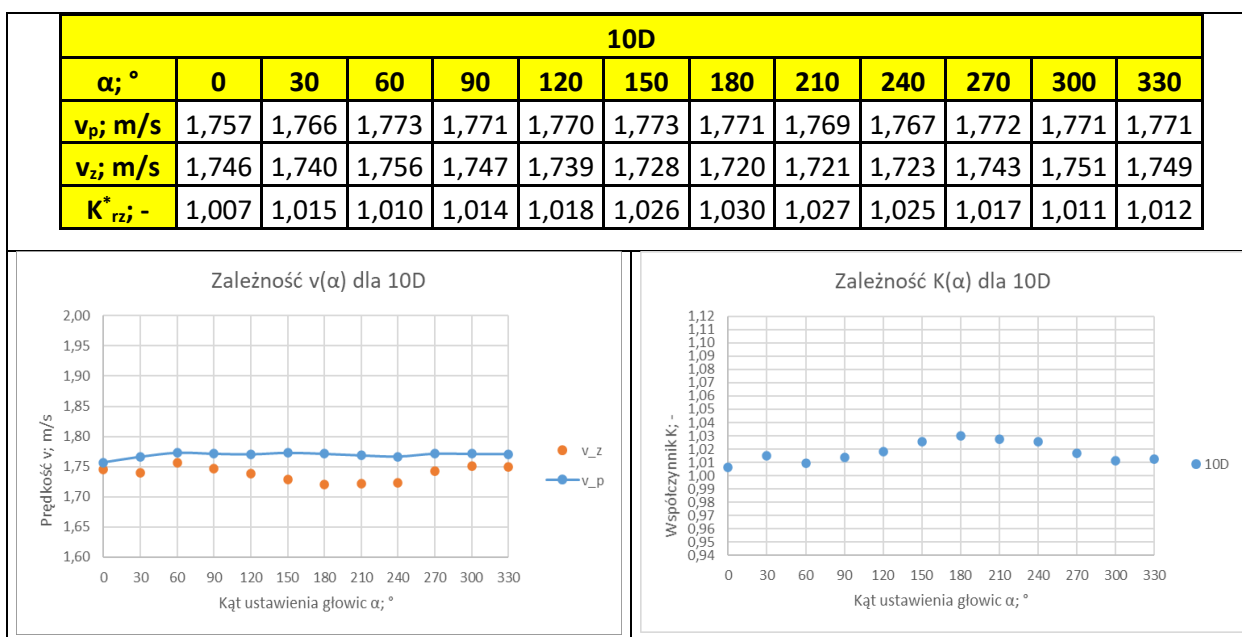


Tabela 6.82. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 12D.

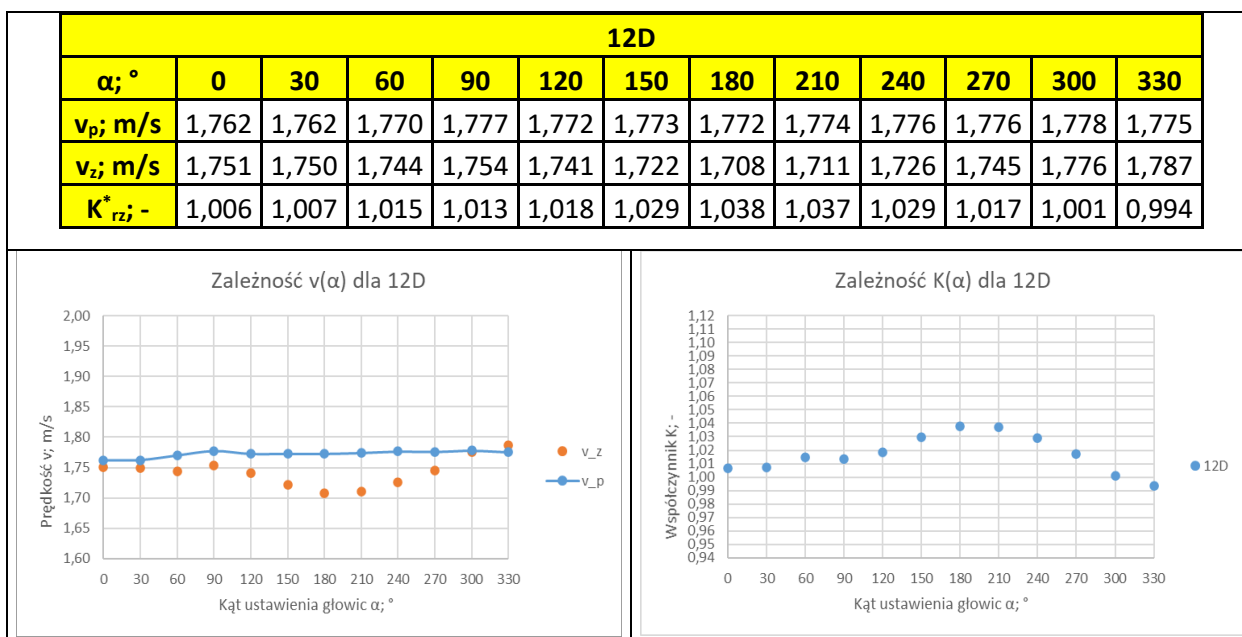
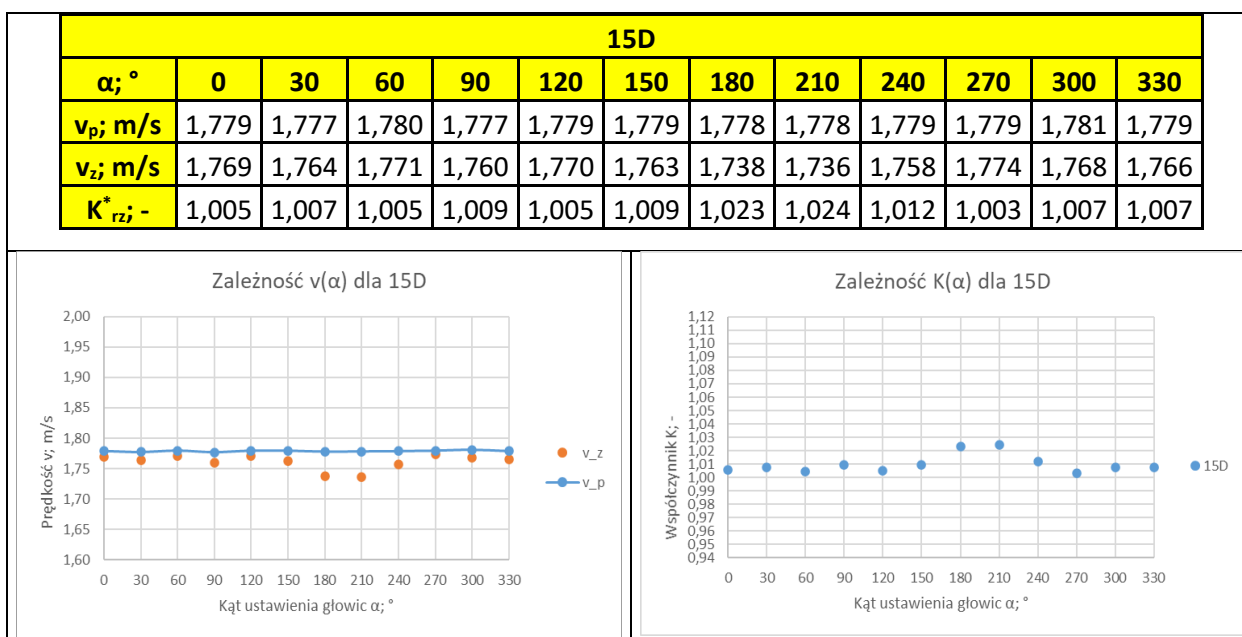


Tabela 6.83. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 15D.

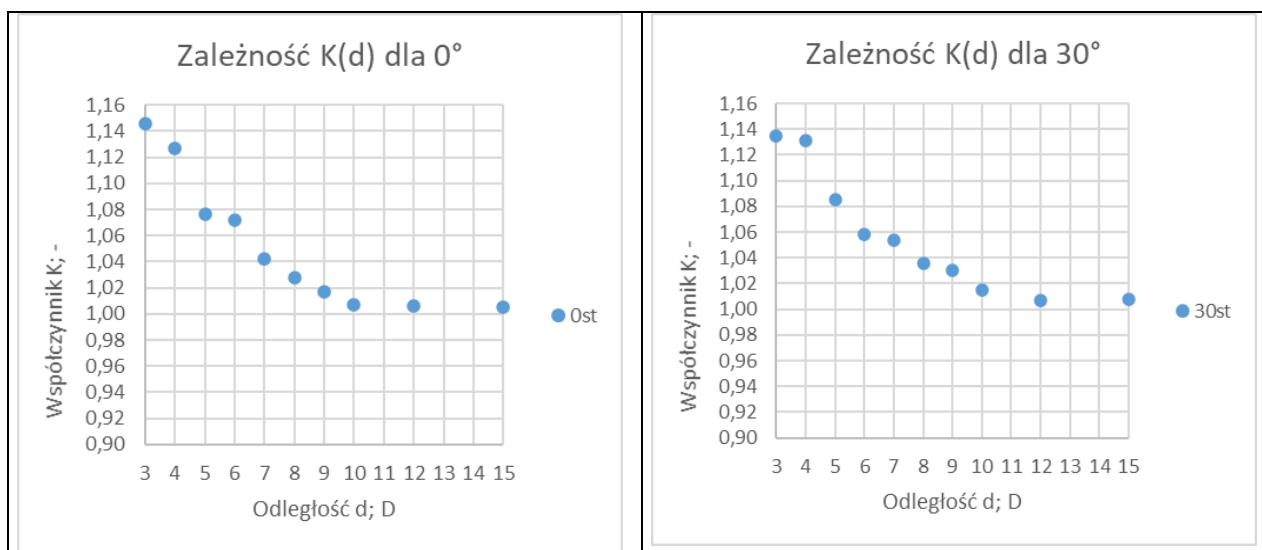


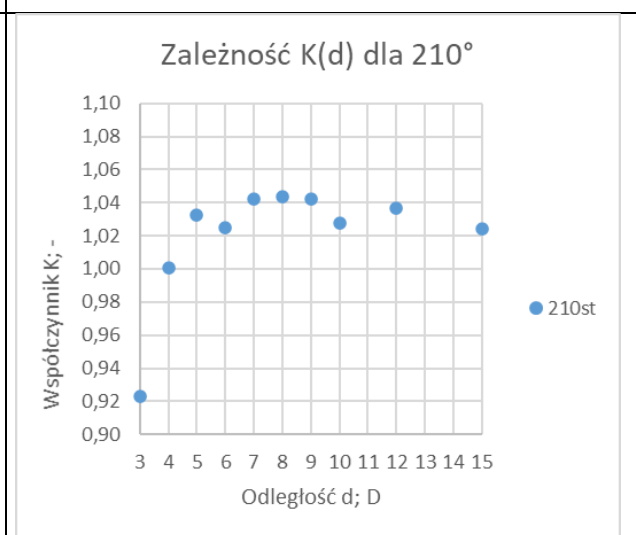
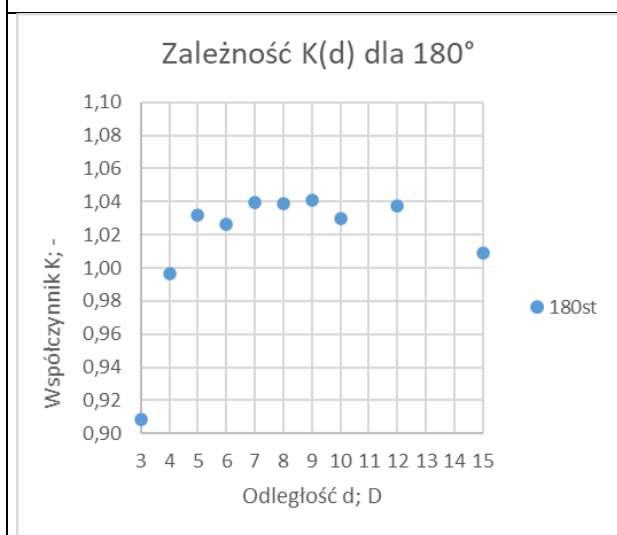
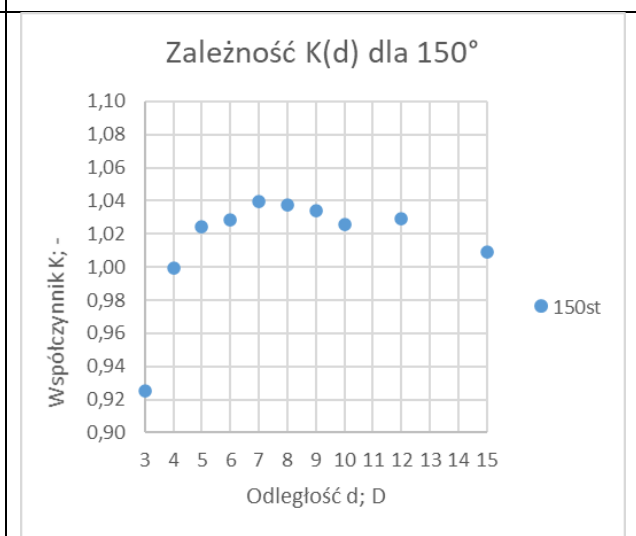
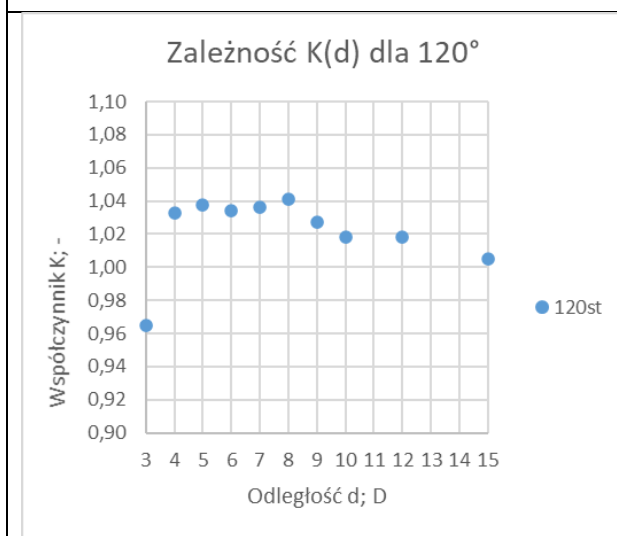
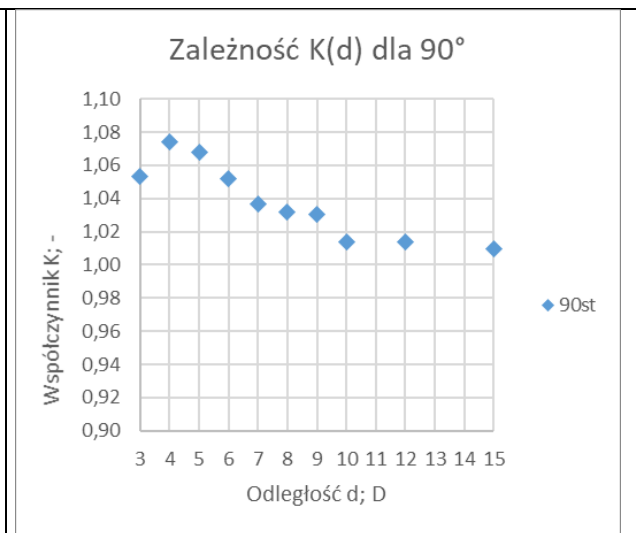
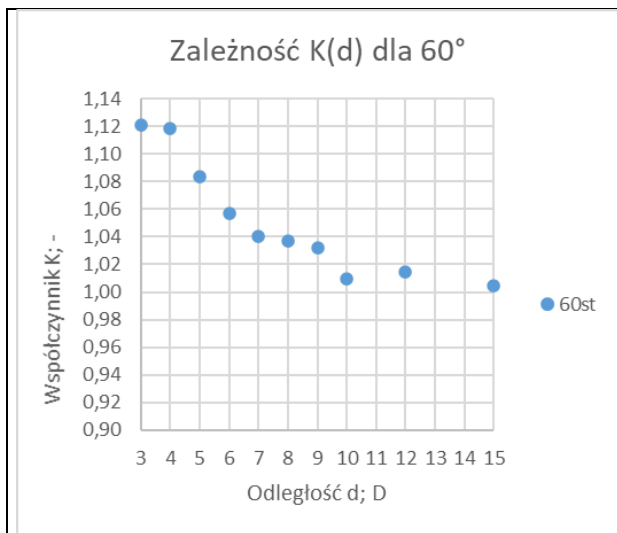
Wyniki pomiarów wykonanych dla ustawienia głowic typu Z przy liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$  dla 1/2 zamknięcia zasuwy wykazują analogiczne własności, jak wyniki pomiarów przy liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$  także dla 1/2 przymknięcia zasuwy. Wraz ze wzrostem odległości przekroju pomiarowego od zasuwy zmniejsza się rozrzut wartości  $K_{rz}^*$  w zależności od kąta  $\alpha$ . W przypadku pomiaru wykonanego w pierwszym przekroju pomiarowym, w odległości 3D od zasuwy nożowej zbiór wartości  $K_{rz}^*$  stanowił zakres (0,909 , 1,145). W każdym kolejnym przekroju pomiarowym dysproporcja pomiędzy wartością minimalną i maksymalną  $K_{rz}^*$  zmniejszała się stopniowo. Dla przekroju 5D zbiór wartości stanowił zakres (1,025 , 1,086), dla przekroju 10D (1,007 , 1,030), dla przekroju 12D (0,994 , 1,038), a dla przekroju 15D (1,003 , 1,024). W odróżnieniu od wyników pomiarów wykonanych dla 1/3 przymknięcia zasuwy, tylko w seriach 3D, 4D i 5D możemy zauważyć kwadratowy charakter

zależności  $K_{rz}^*(\alpha)$ . W pozostałych przekrojach pomiarowych wartości  $K_{rz}^*$  dla różnych  $\alpha$  są do siebie zbliżone i oscylują wokół wartości średniej w zakresie  $\pm$  błędu pomiarowego przepływomierza. Dla przekrojów pomiarowych 3D – 5D największe wartości  $K_{rz}^*$  występują dla skrajnych wartości kąta  $\alpha= 0^\circ$  i  $330^\circ$ . W kolejnych przekrojach dysproporcje między wartościami  $K_{rz}^*$  dla  $\alpha= 0^\circ$  i  $330^\circ$ , a wartościami dla pozostałych kątów są znacznie mniejsze i wartości te dążą do wyrównania.

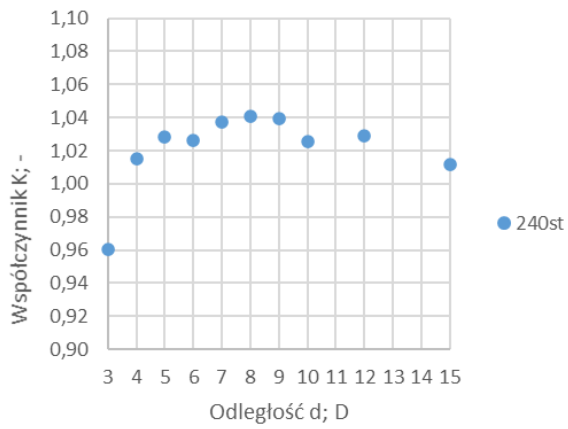
Przebieg zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  wykazuje analogiczne cechy jak przebieg zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  przy liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$  także dla 1/2 przymknięcia zasuw. Dla wszystkich kątów  $\alpha$  widoczne jest wyraźne wyrównanie się prędkości  $v_p$  i  $v_z$  wraz ze wzrostem odległości przekroju pomiarowego od zasuw, co objawia się w zbliżaniu się wartości współczynnika  $K_{rz}^*$  do wartości  $=1 \pm$  błąd pomiarowy przepływomierza. Największa różnica między maksymalną i minimalną wartością  $K_{rz}^*$  występuje dla kątów  $\alpha= 0^\circ, 30^\circ$  i  $330^\circ$ . W przypadku kątów z zakresu  $\alpha= 0^\circ - 60^\circ$  oraz  $300^\circ - 330^\circ$  widoczna jest wyraźna tendencja spadkowa wartości  $K_{rz}^*$ . Od przekroju pomiarowego 9D - 10D wartość  $K_{rz}^*$  ulega stabilizacji na, w przybliżeniu, stałym poziomie. Dla pozostałych kątów dokonywania pomiarów  $\alpha$  wartości  $K_{rz}^*$  szybciej zbiegają do wartości  $K_{rz}^*= 1 \pm$  błąd pomiarowy przepływomierza.

Tabela 6.84. Graficzna prezentacja zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ - 330^\circ$ , dla 1/2 wysokości zamknięcia zasuw nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu Z przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$ .

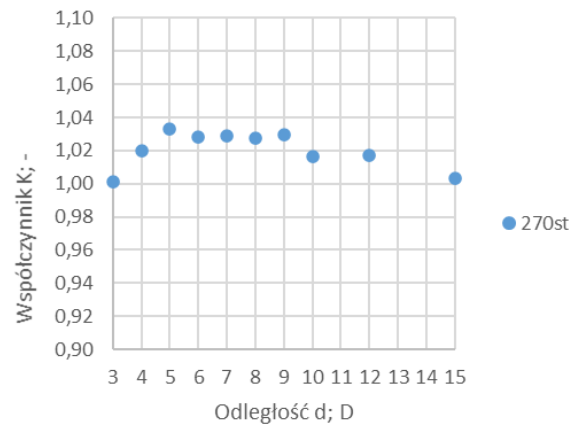




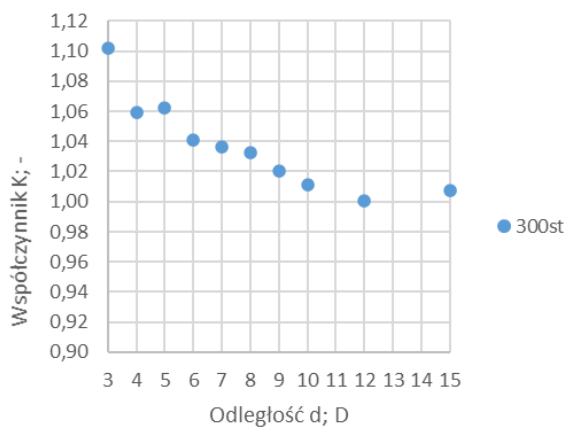
Zależność  $K(d)$  dla  $240^\circ$



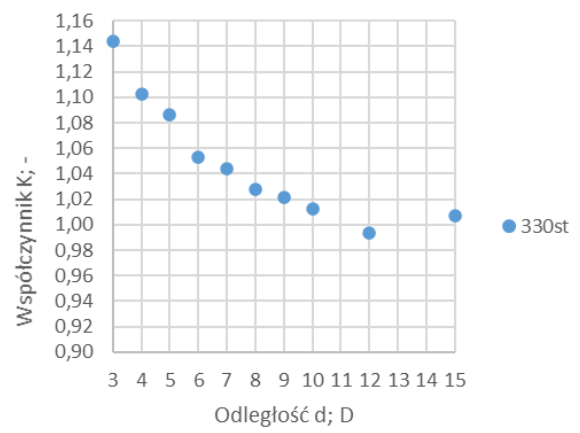
Zależność  $K(d)$  dla  $270^\circ$



Zależność  $K(d)$  dla  $300^\circ$



Zależność  $K(d)$  dla  $330^\circ$





### 6.2.5 Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 70\ 000$ i układzie głowic V

Poniżej w rozdziale 6.2.2 zamieszczono wyniki pomiarów i obliczeń dla serii pomiarowej wykonanej przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw nożowej, przy liczbie Reynoldsa przepływu  $Re \approx 70\ 000$  i ustawieniu głowic przepływomierza ultradźwiękowego typu V. W tabelach 6.85 - 6.95 zostały umieszczone wykresy stworzone na podstawie danych pomiarowych oraz rezultatów obliczeń.

Tabela 6.85. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 3D.

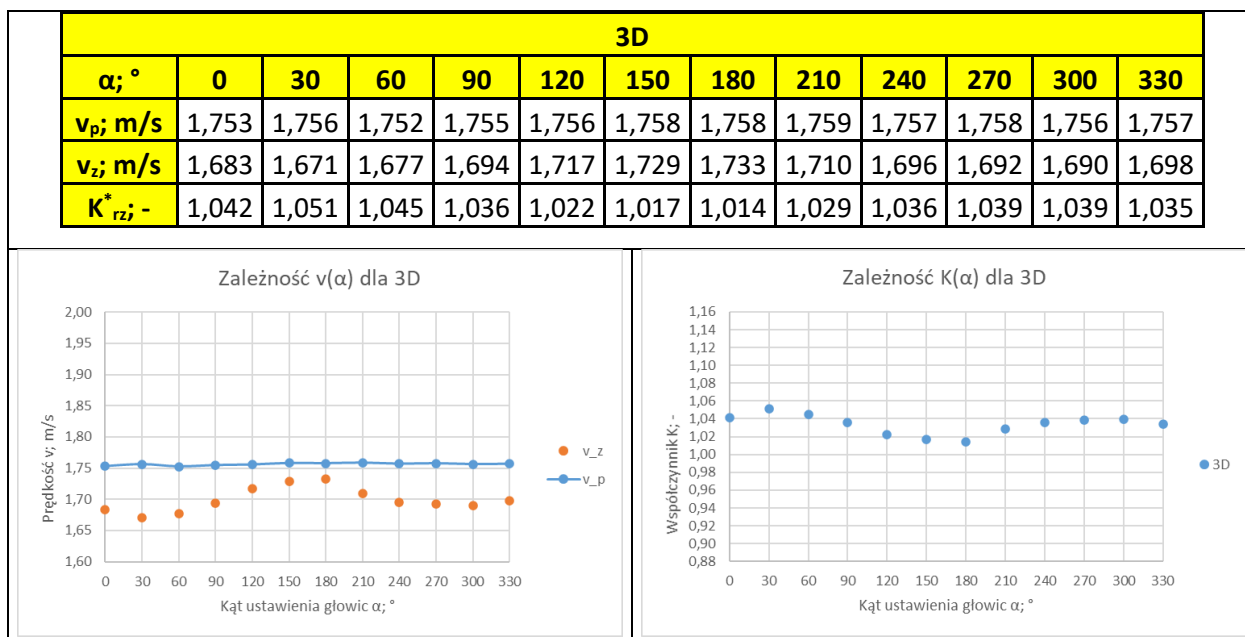


Tabela 6.86. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 4D.

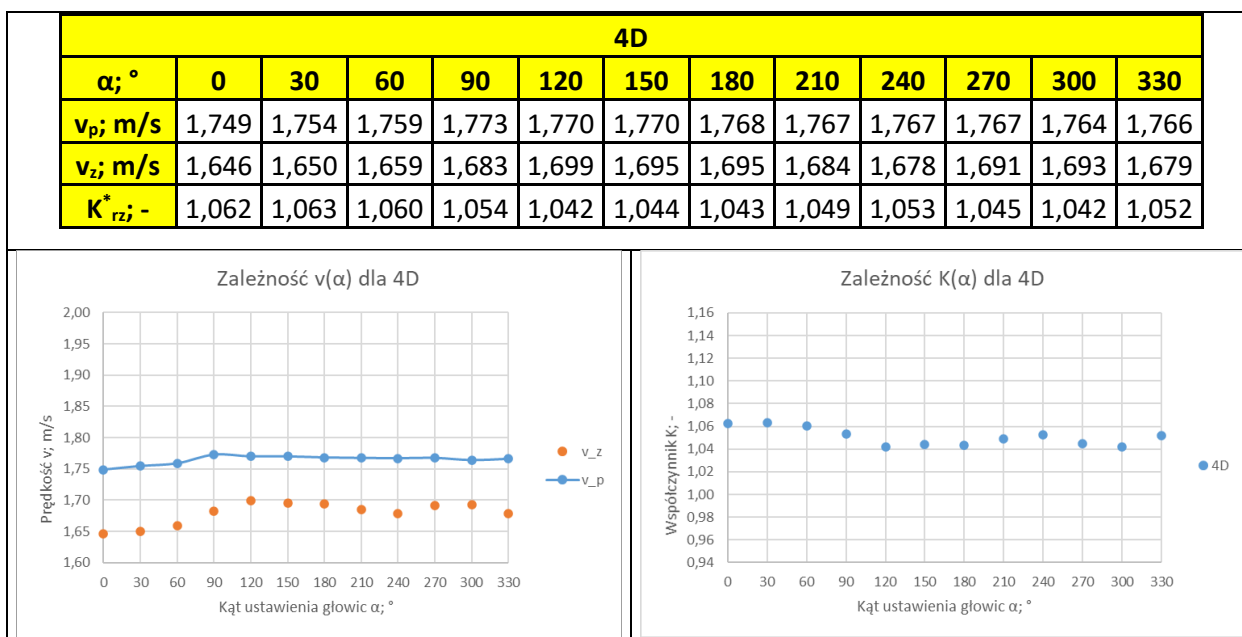


Tabela 6.87. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 5D.

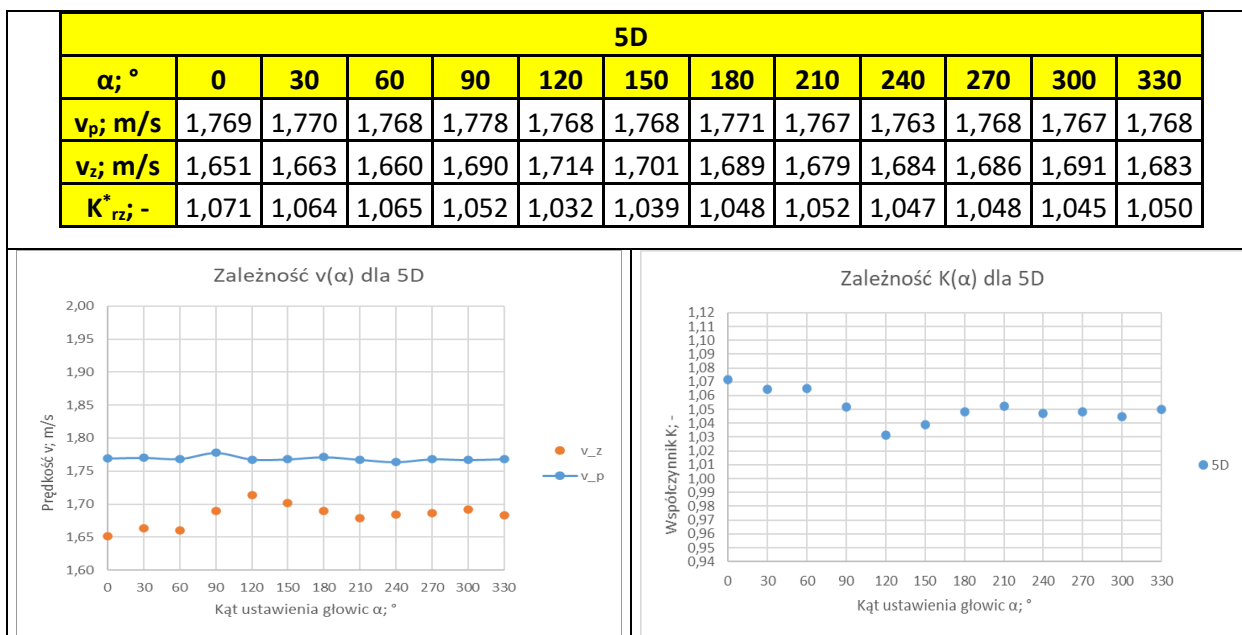


Tabela 6.88. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 6D.

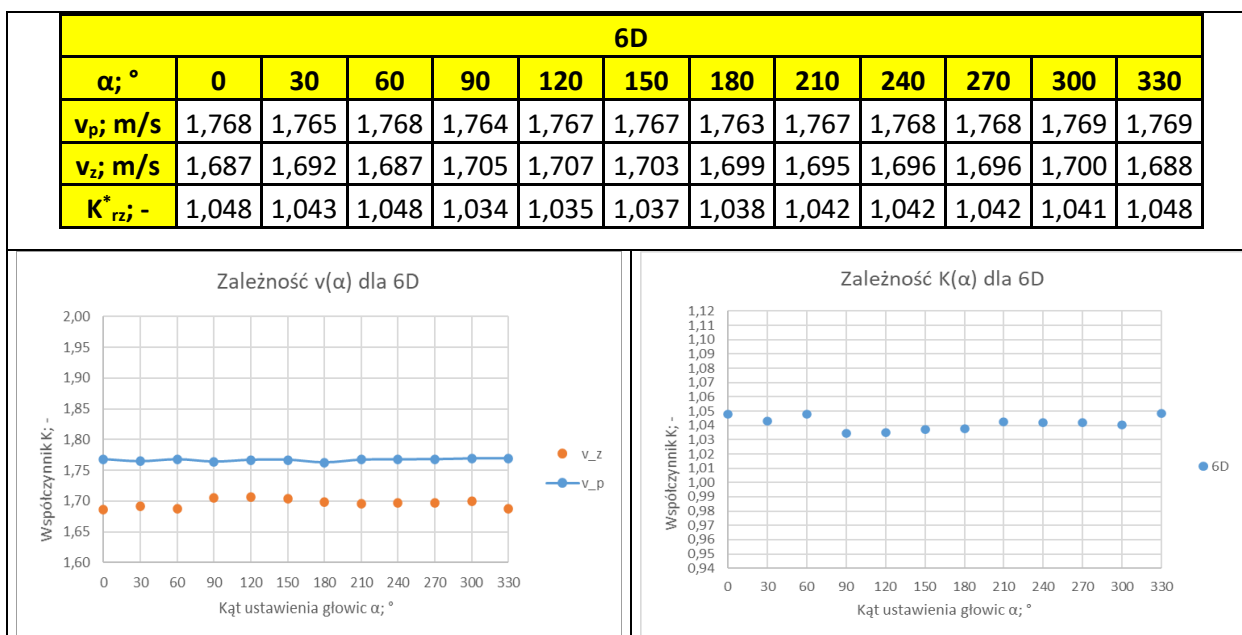


Tabela 6.89. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 7D.

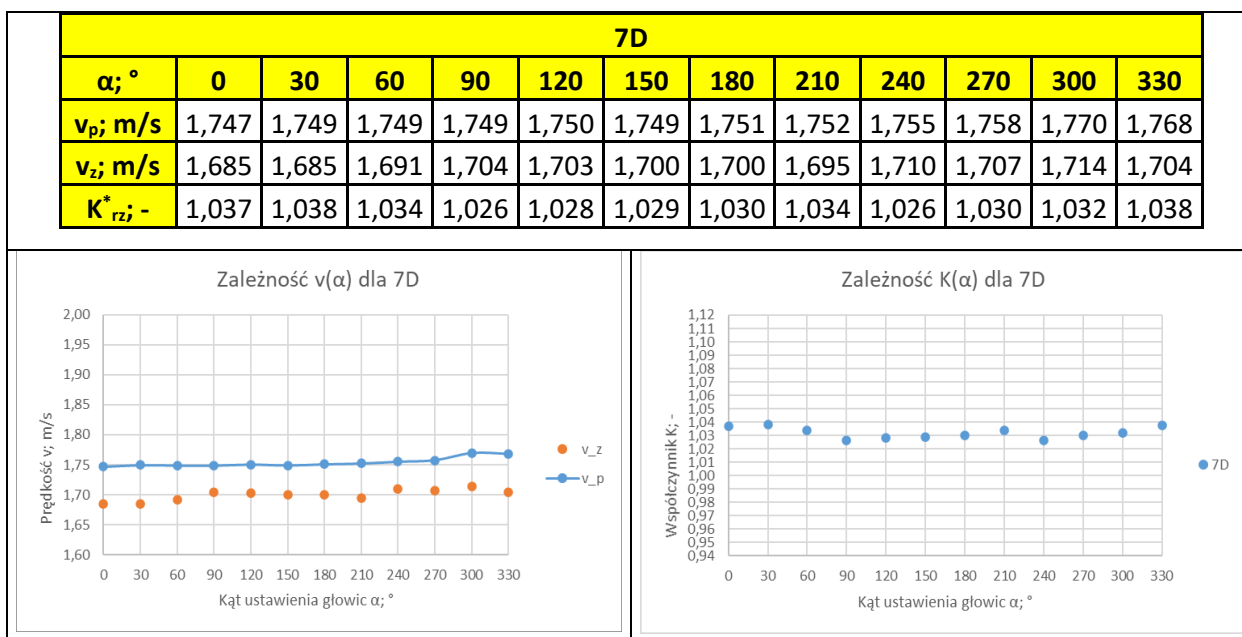


Tabela 6.90. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 8D.

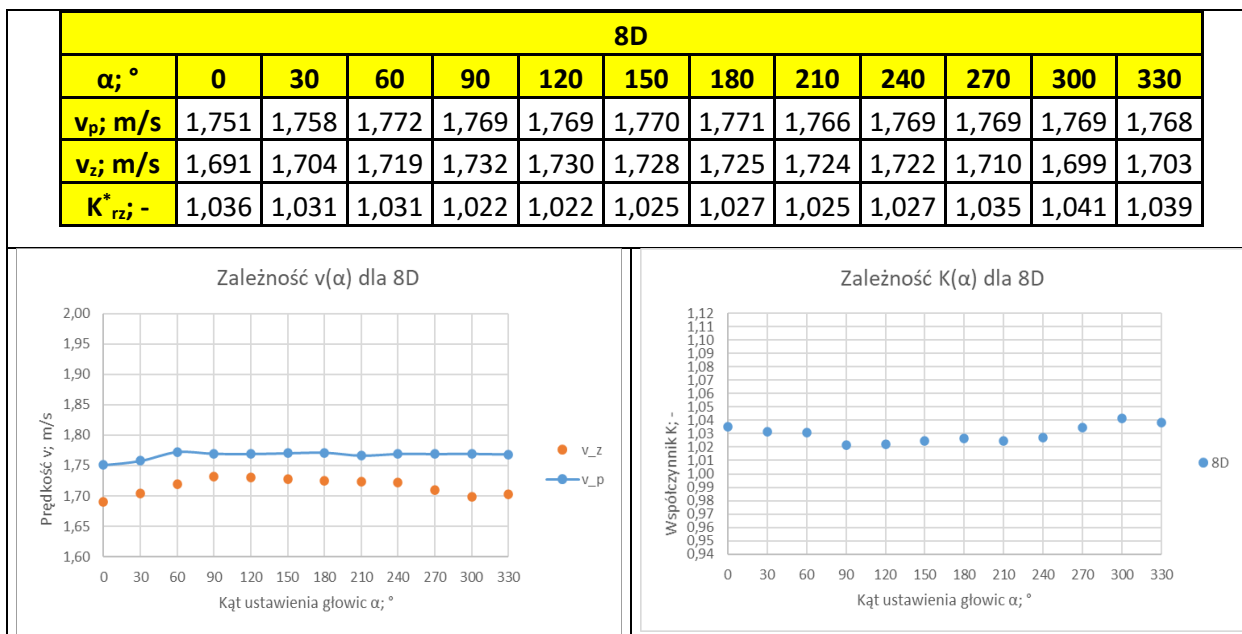


Tabela 6.91. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 9D.

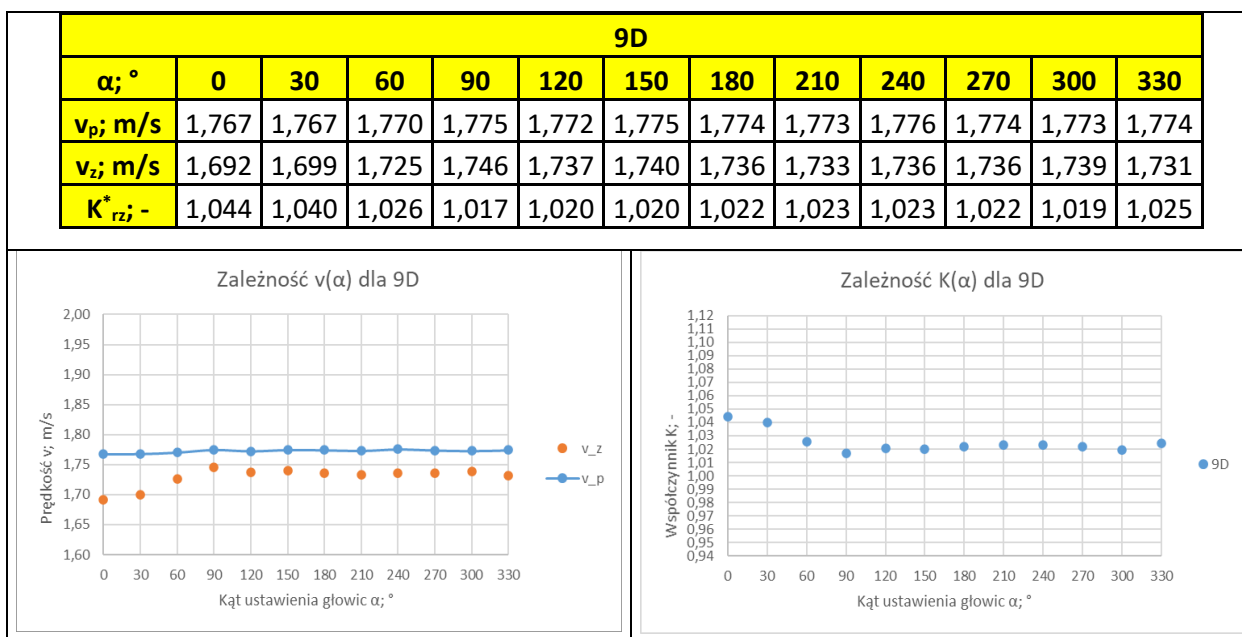


Tabela 6.92. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 10D.

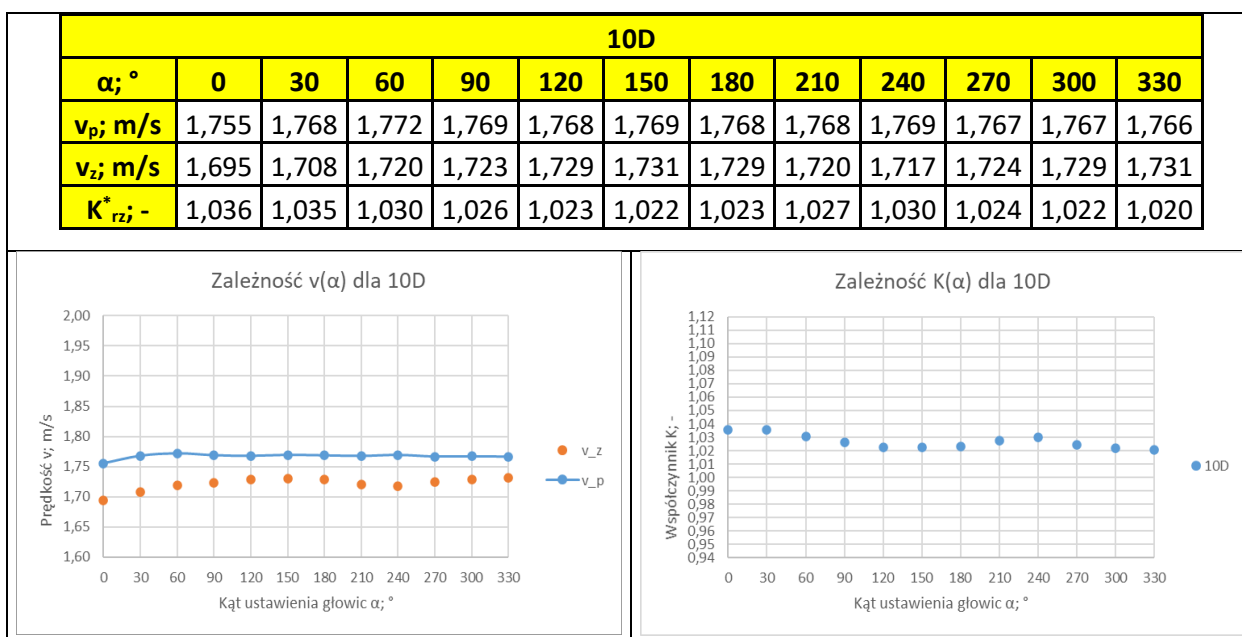


Tabela 6.93. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 12D.

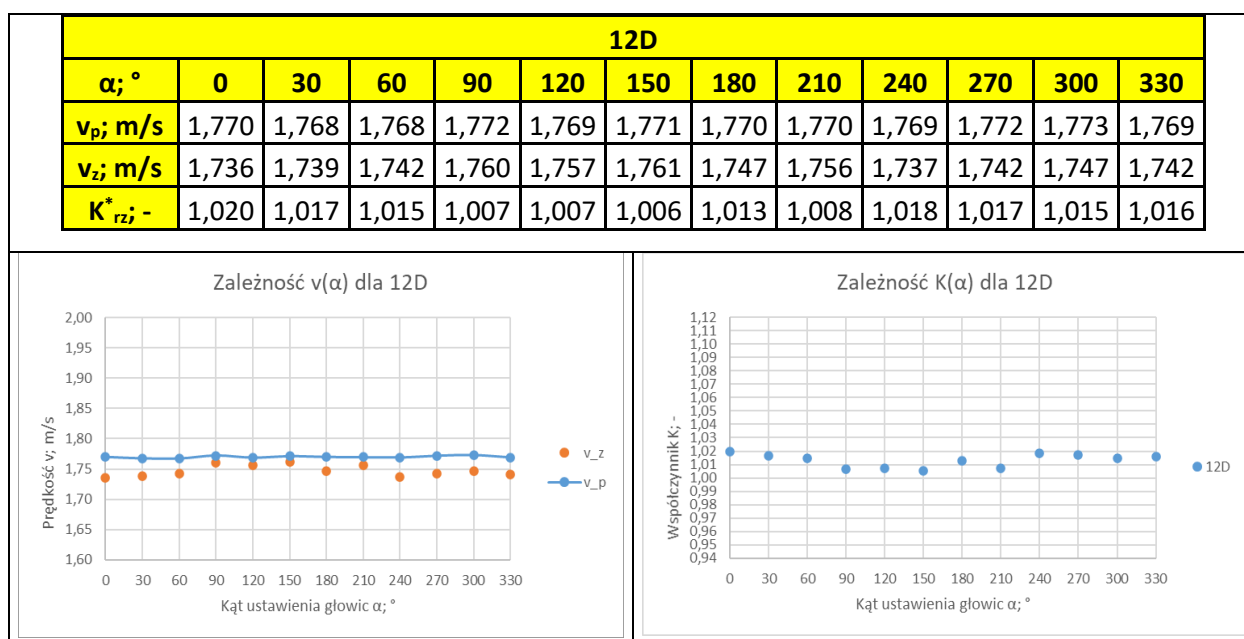
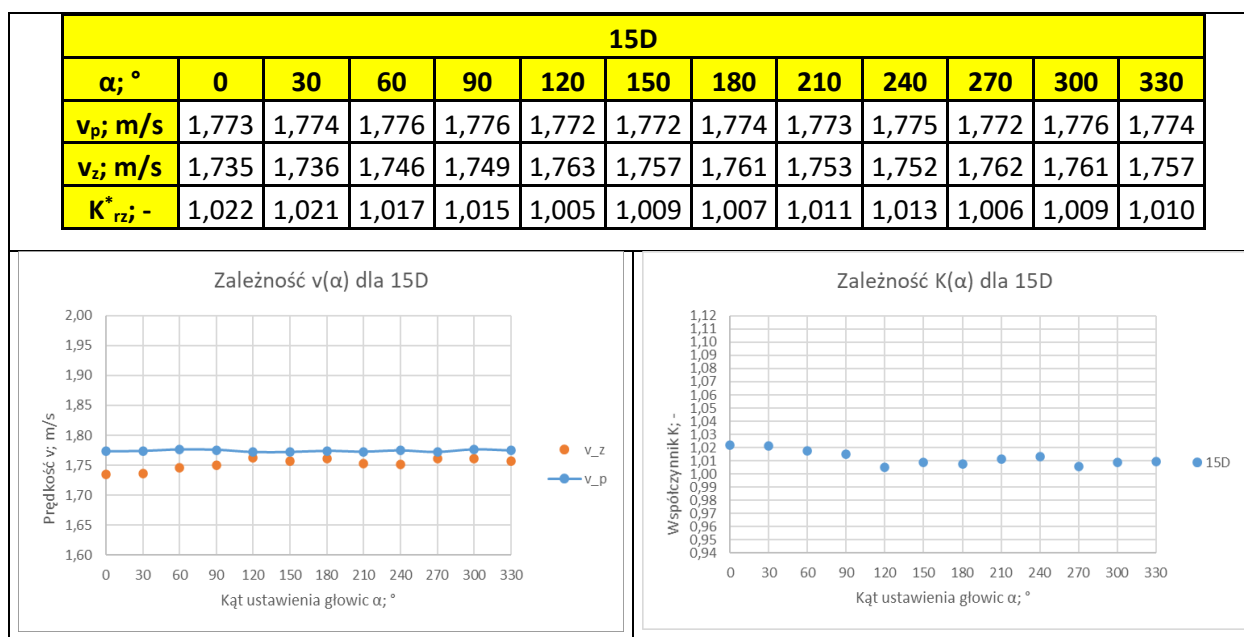


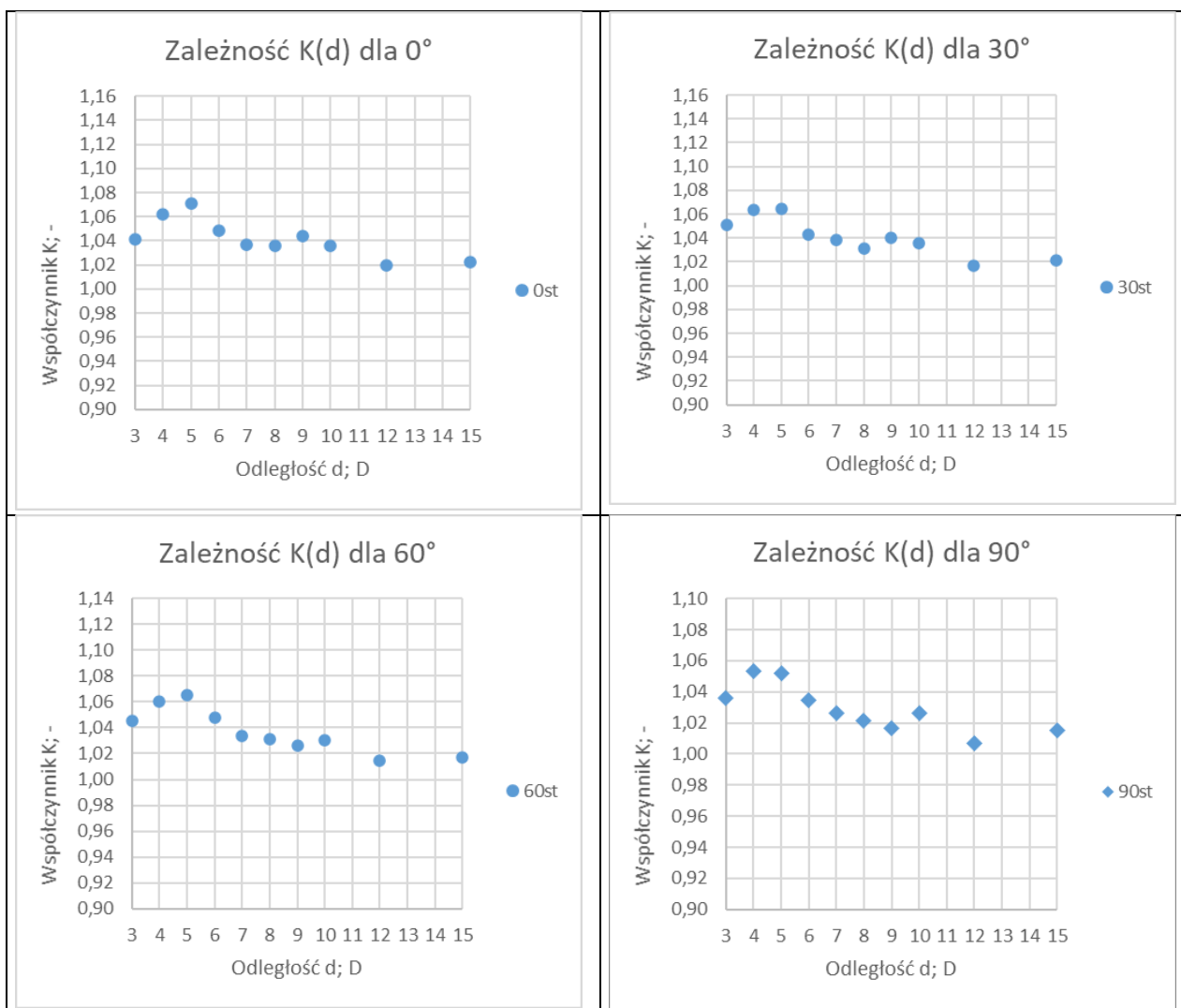
Tabela 6.94. Tabela zawierająca dane pomiarowe zebrane podczas pomiarów w przekroju pomiarowym 15D.

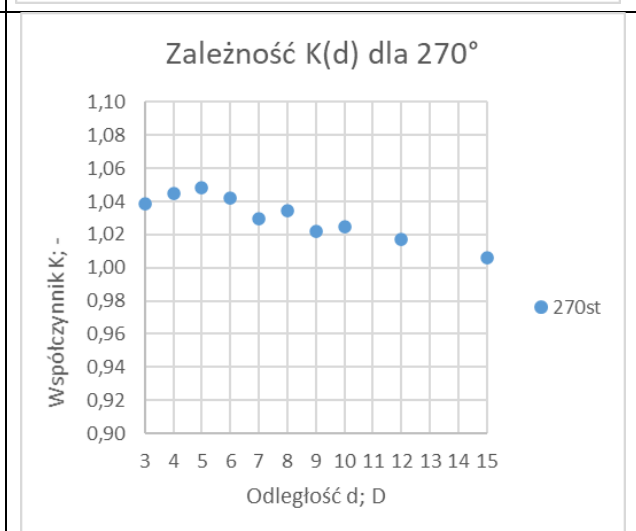
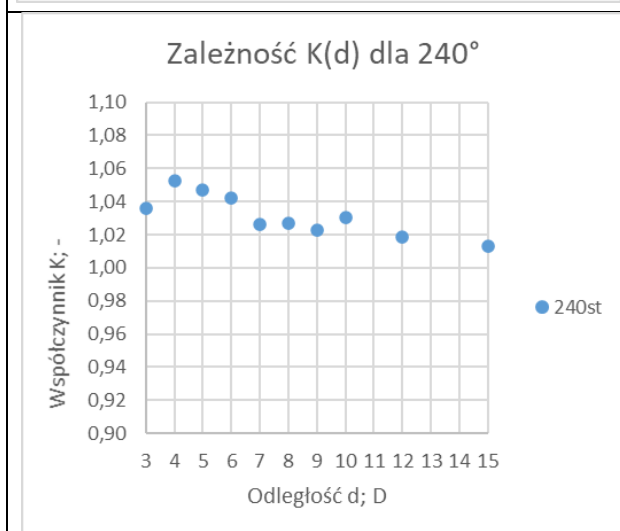
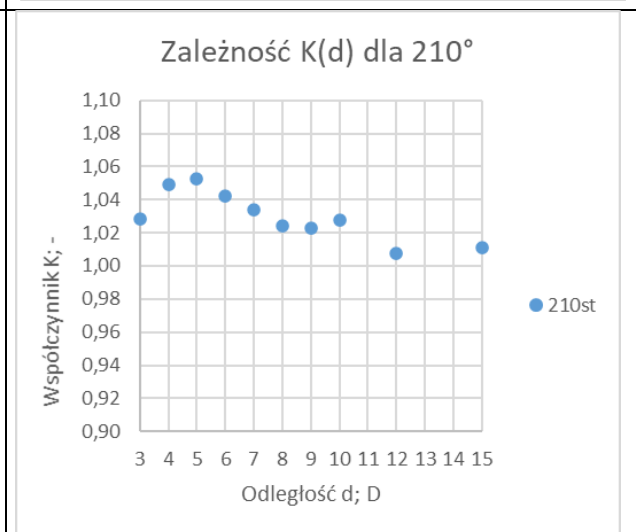
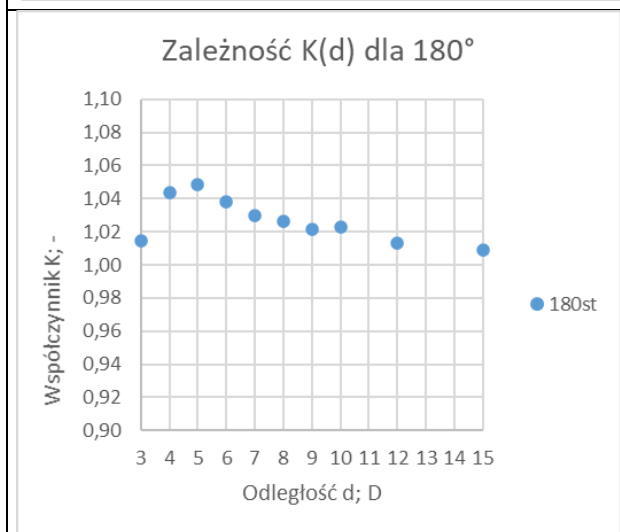
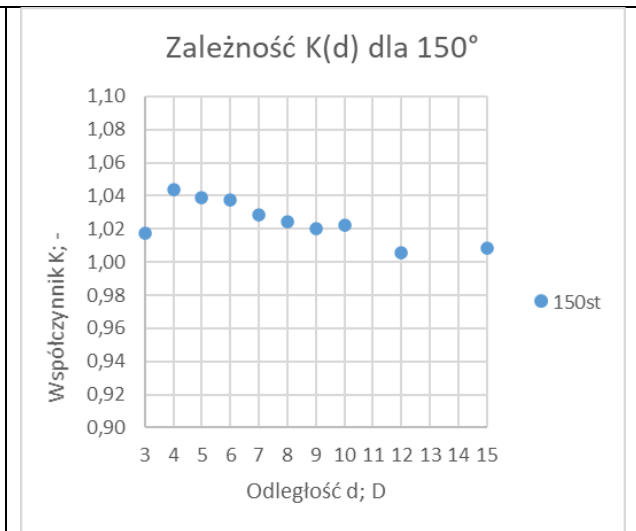
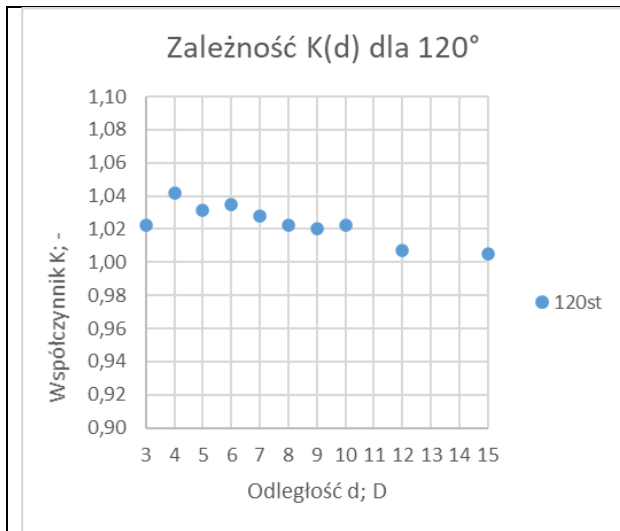


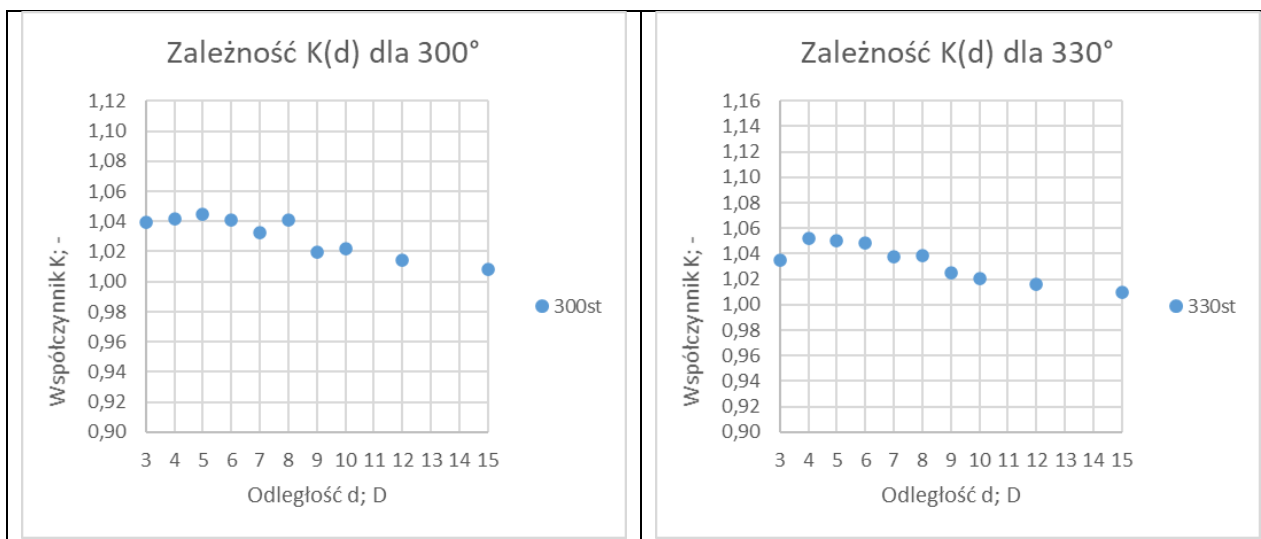
Wyniki pomiarów wykonanych dla ustawienia głowic typu Z przy liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\,000$  dla 1/2 przyknięcia zasowy wykazują analogiczne własności, jak wyniki pomiarów przy liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\,000$  także dla 1/2 przyknięcia zasowy. Rozrzut wartości  $K_{rz}^*$  w zależności od kąta  $\alpha$  jest znacznie mniejszy niż w przypadku pomiarów wykonanych w ustawieniu głowic typu Z. Wraz ze zwiększeniem odległości przekroju pomiarowego od zasowy przebieg zależności ulega nieznacznemu spłaszczeniu. W przypadku pomiaru wykonanego przekroju pomiarowym 3D zbiór wartości  $K_{rz}^*$  stanowił zakres (1,014, 1,05), dla przekroju 5D zbiór wartości stanowił zakres (1,032, 1,071), dla przekroju 10D (1,020, 1,036) dla przekroju 12D (1,006, 1,020), a dla przekroju 15D (1,005, 1,022).

Opisany powyżej przebieg zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  potwierdzają zamieszczone poniżej wykresy zależności wartości  $K_{rz}^*$  od odległości przekroju pomiarowego dla poszczególnych kątów  $\alpha$ . Dla wszystkich kątów  $\alpha$  widoczne jest wyrównanie się prędkości  $v_p$  i  $v_z$  wraz ze wzrostem odległości przekroju pomiarowego od zasuwy, co objawia się w zbliżaniu się wartości współczynnika  $K_{rz}^*$  do wartości  $= 1 \pm$  błąd pomiarowy przepływomierza. Zauważalne jest, że w przekroju pomiarowym 3D znajdującym się najbliżej zasuwy wartość  $K_{rz}^*$  nie mieści się w zakresie  $1 \pm$  błąd pomiarowy przepływomierza, jak miało to miejsce w przypadku pomiarów wykonanych dla 1/3 zamknięcia zasuwy. Jest to spowodowane większym zaburzeniem przepływu spowodowanym większym stopniem przymknięcia zasuwy. Dla większości kątów maksymalna wartość  $K_{rz}^*$  jest osiągnięta w przekrojach 4D - 6D, a w kolejnych przekrojach wartość  $K_{rz}^*$  zaczyna stabilizować się wokół wartości  $K_{rz}^*=1$ , w granicach  $\pm$  błędu pomiarowego przepływomierza.

Tabela 6.95 Graficzna prezentacja zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla 1/2 wysokości zamknięcia zasuwy nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu V przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$ .







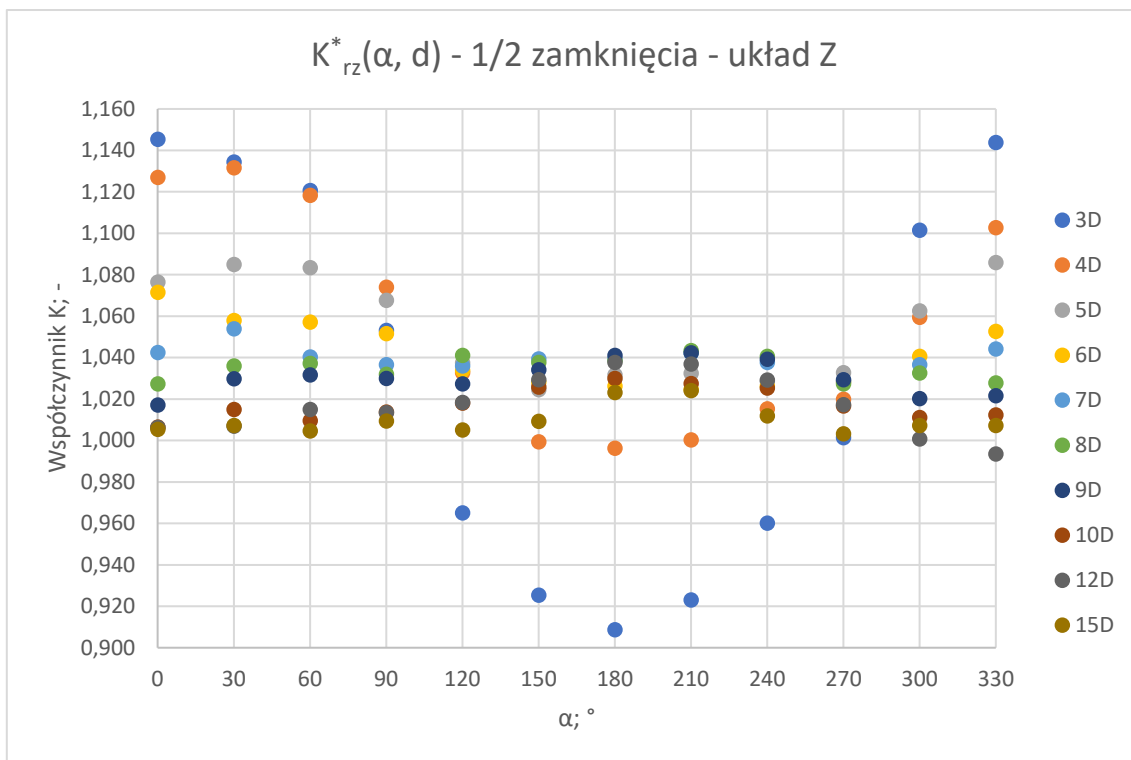
### 6.2.6 Wyniki pomiarów wykonanych przy $Re \approx 70\ 000$ – podsumowanie

W rozdziale 6.2.6 zamieszone zostały zbiorcze wyniki pomiarów wykonanych przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw nożowej, przy liczbie Reynoldsa przepływu  $Re \approx 70\ 000$  dla ustawień głowic ultradźwiękowych typu Z i typu V. Stworzone wykresy zależności  $K(\alpha, d)$  rys. 6.7 i rys. 6.8 pozwalają na porównanie rezultatów badań dla obu ustawień głowic ultradźwiękowych.

Tabela 6.96. Zbiorcze zestawienie zależności  $K^*_{\tau z}(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ – $330^\circ$ , dla 1/2 wysokości zamknięcia zasuw nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu Z przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$ .

Re $\approx$ 70 000 - układ Z												
$\alpha; ^\circ$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
<b>3D</b>	1,145	1,134	1,121	1,053	0,965	0,925	0,909	0,923	0,960	1,001	1,102	1,144
<b>4D</b>	1,127	1,132	1,118	1,074	1,033	0,999	0,996	1,000	1,015	1,020	1,060	1,103
<b>5D</b>	1,077	1,085	1,083	1,068	1,038	1,025	1,032	1,032	1,029	1,033	1,063	1,086
<b>6D</b>	1,072	1,058	1,057	1,052	1,034	1,028	1,026	1,025	1,026	1,028	1,041	1,053
<b>7D</b>	1,043	1,054	1,040	1,037	1,036	1,039	1,039	1,042	1,038	1,029	1,037	1,044
<b>8D</b>	1,027	1,036	1,037	1,032	1,041	1,038	1,039	1,043	1,041	1,027	1,033	1,028
<b>9D</b>	1,017	1,030	1,032	1,030	1,027	1,034	1,041	1,042	1,039	1,029	1,020	1,022
<b>10D</b>	1,007	1,015	1,010	1,014	1,018	1,026	1,030	1,027	1,025	1,017	1,011	1,012
<b>12D</b>	1,006	1,007	1,015	1,013	1,018	1,029	1,038	1,037	1,029	1,017	1,001	0,994
<b>15D</b>	1,005	1,007	1,005	1,009	1,005	1,009	1,023	1,024	1,012	1,003	1,007	1,007

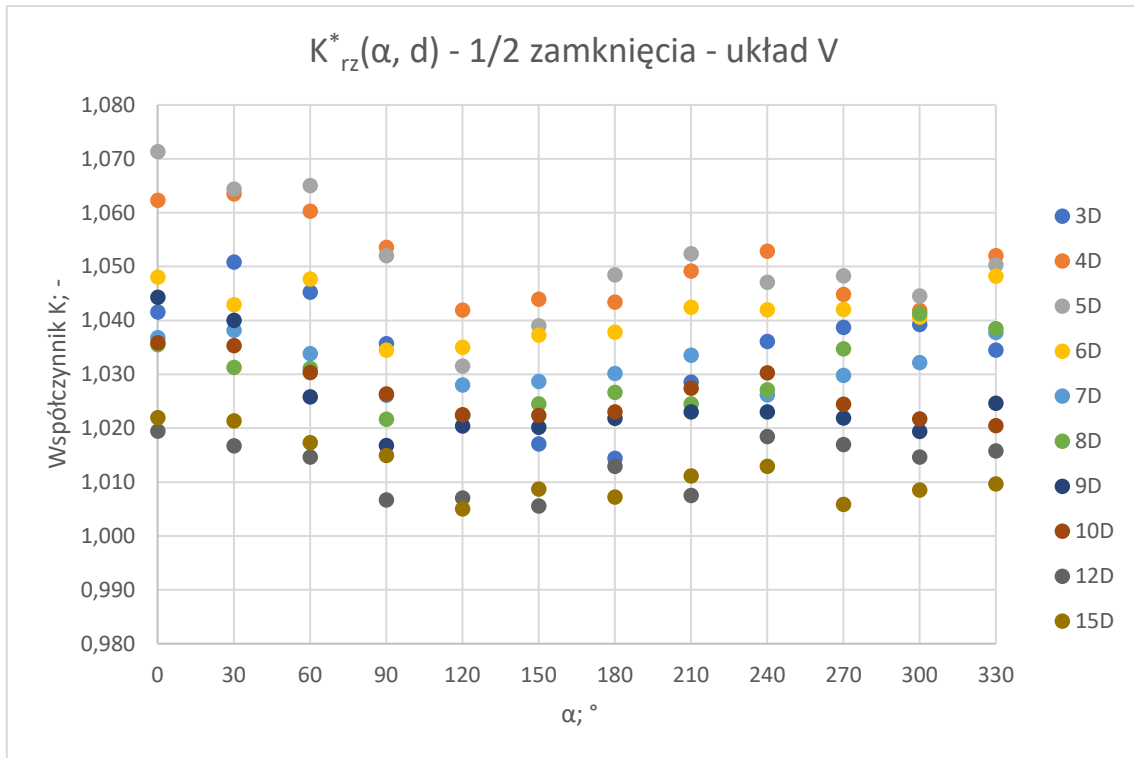




Rys. 6.7 Wykres zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla  $1/2$  wysokości zamknięcia zasuw nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu Z przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$ .

Tabela 6.97 Zbiornicze zestawienie zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla  $1/2$  wysokości zamknięcia zasuw nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu V przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$ .

Re $\approx$ 70 000 - układ V												
$\alpha; ^\circ$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
<b>3D</b>	1,042	1,051	1,045	1,036	1,022	1,017	1,014	1,029	1,036	1,039	1,039	1,035
<b>4D</b>	1,062	1,063	1,060	1,054	1,042	1,044	1,043	1,049	1,053	1,045	1,042	1,052
<b>5D</b>	1,071	1,064	1,065	1,052	1,032	1,039	1,048	1,052	1,047	1,048	1,045	1,050
<b>6D</b>	1,048	1,043	1,048	1,034	1,035	1,037	1,038	1,042	1,042	1,042	1,041	1,048
<b>7D</b>	1,037	1,038	1,034	1,026	1,028	1,029	1,030	1,034	1,026	1,030	1,032	1,038
<b>8D</b>	1,036	1,031	1,031	1,022	1,022	1,025	1,027	1,025	1,027	1,035	1,041	1,039
<b>9D</b>	1,044	1,040	1,026	1,017	1,020	1,020	1,022	1,023	1,023	1,022	1,019	1,025
<b>10D</b>	1,036	1,035	1,030	1,026	1,023	1,022	1,023	1,027	1,030	1,024	1,022	1,020
<b>12D</b>	1,020	1,017	1,015	1,007	1,007	1,006	1,013	1,008	1,018	1,017	1,015	1,016
<b>15D</b>	1,022	1,021	1,017	1,015	1,005	1,009	1,007	1,011	1,013	1,006	1,009	1,010

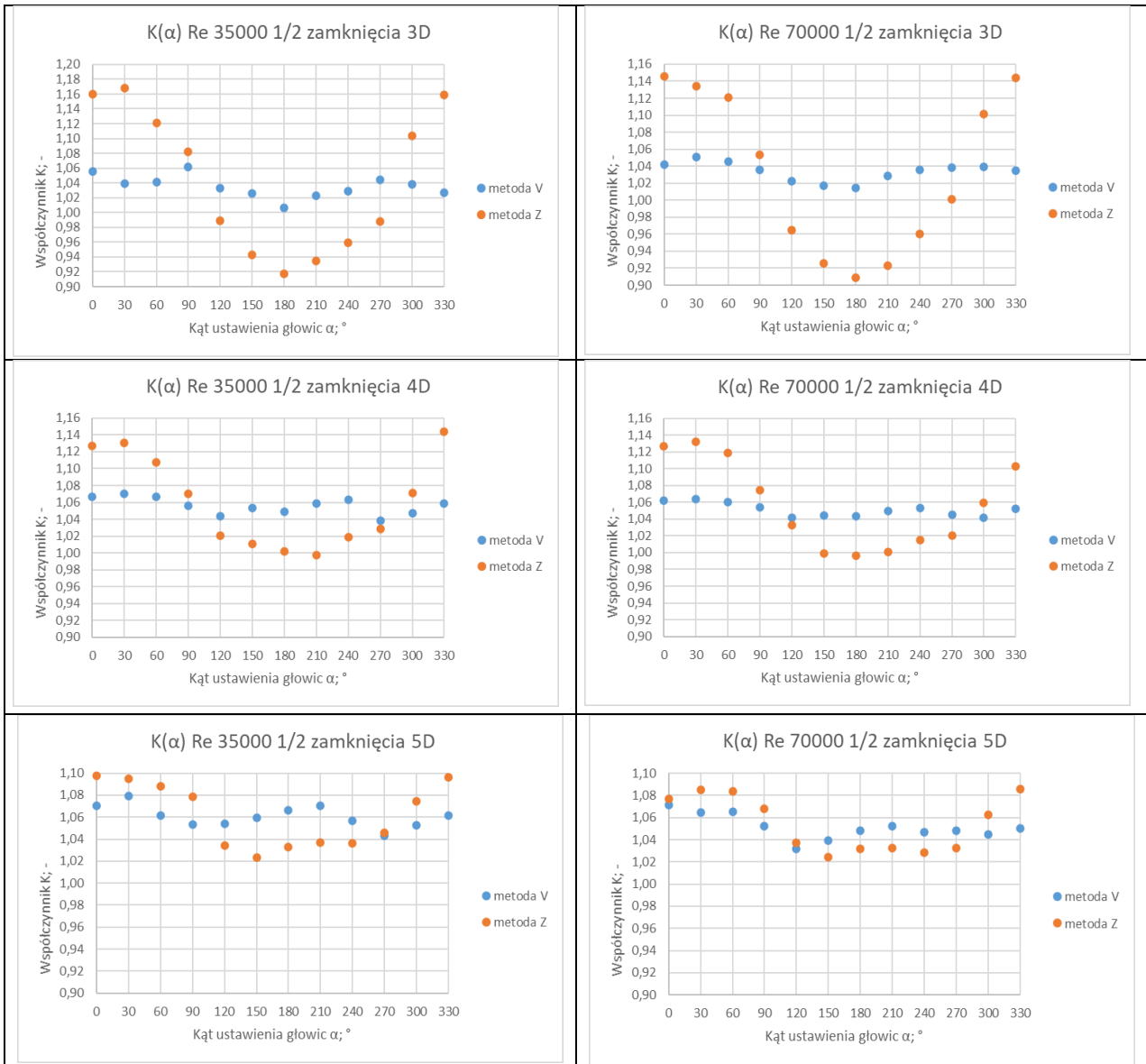


Rys. 6.8. Wykres zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla zakresu kątów ustawienia głowic ultradźwiękowych  $0^\circ$ - $330^\circ$ , dla  $1/2$  wysokości zamknięcia zasuw nożowej, dla ustawienia głowic w układzie typu V przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$ .

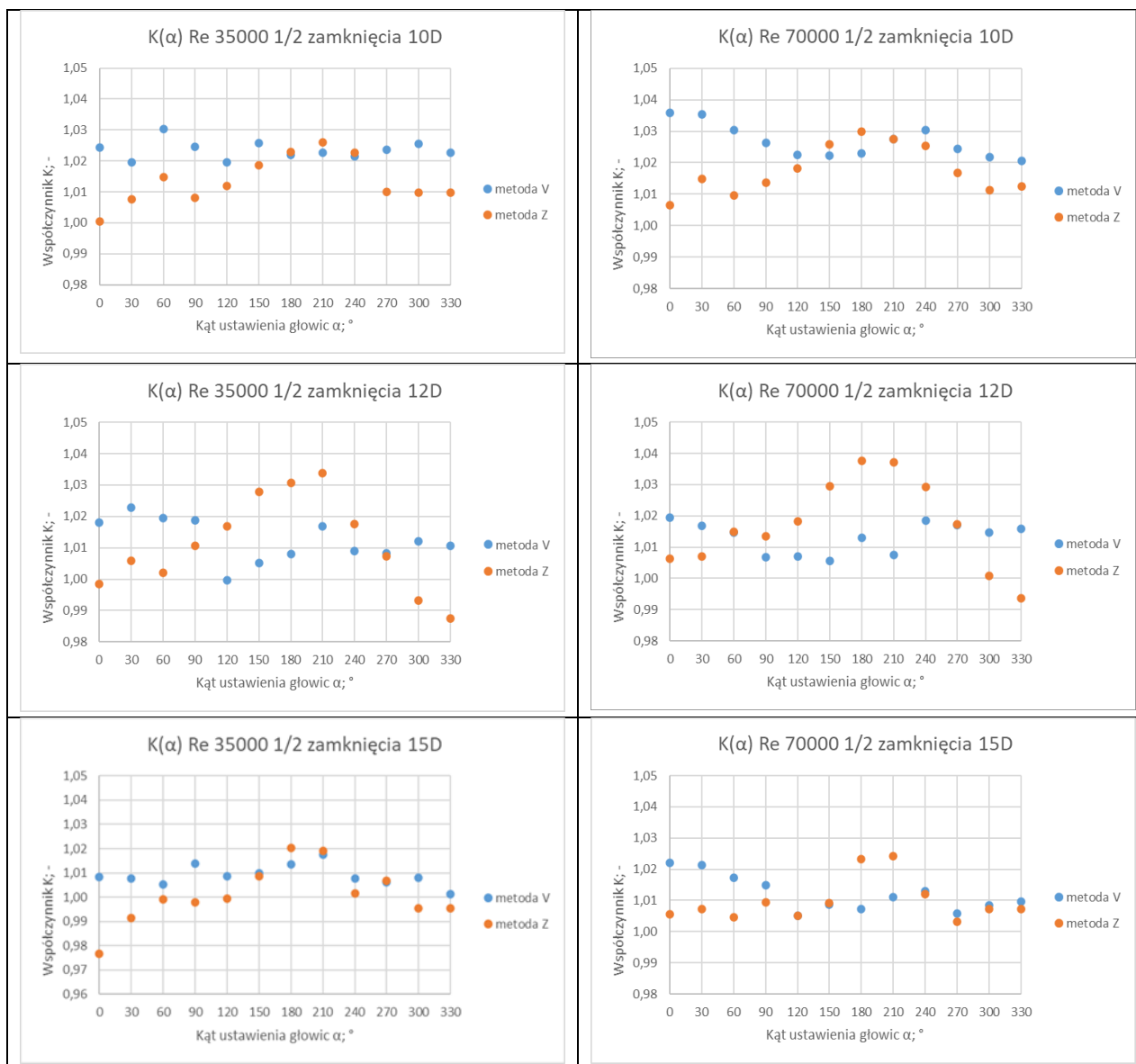
### 6.2.7 1/2 zamknięcia – podsumowanie wszystkich serii pomiarowych

W tabeli 6.98 zamieszczono wykresy stworzone na podstawie pomiarów wykonanych przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuwy nożowej. Na wykresach stworzonych dla różnych liczb Reynoldsa ( $Re \approx 35\ 000$  i  $Re \approx 70\ 000$ ) zamieszczono dane dla serii pomiarowych reprezentujących ustawienie głowic ultradźwiękowych typu Z i typu V.

Tabela 6.98. Zbiornicze zestawienie zależności  $K^*_{rz}(\alpha, d)$  dla 1/2 wysokości zamknięcia zasuwy nożowej przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$  i  $Re \approx 70\ 000$ .







Podobnie jak w przypadku podsumowania badań wykonanych przy zasłonięciu 1/3 wysokości zasuw nożowej (rozdział 6.1.7), na podstawie analizy wykresów przedstawionych w rozdziałach 6.2.1-6.2.7 sformułowano główne konkluzje dotyczące pomiarów przy zasłonięciu 1/2 wysokości zasuw. Wykresy zbiorcze zawierają dane z serii pomiarowych wykonanych przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw dla różnych liczb Reynoldsa: przy  $Re \approx 35\ 000$  i  $Re \approx 70\ 000$ . Na wykresach zamieszczono 2 serie danych: dane pochodzące z pomiarów wykonanych w ustawieniu głowic przepływomierza typu Z i ustawieniu typu V.

Większość obserwacji dotyczących przebiegu funkcji  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  dla obu serii pomiarowych pokrywa się i prowadzi do analogicznych wniosków:

- Ustawienie głowic w układzie V skutkuje znacznie mniejszym rozrzutem wartości prędkości dla poszczególnych kątów niż ustawienie typu Z. Spowodowane jest to podwójnym przejściem fali ultradźwiękowej pomiędzy czujnikami w ustawieniu typu V, co pozwala uśrednić prędkość w większej przestrzeni przepływu pomiędzy czujnikami niż ustawienie typu Z,

- Ustawienie głowic typu V wykazuje znacznie mniejszą zmienność w zależności od odległości przekroju pomiarowego od zasuwy, będącej źródłem zaburzeń przepływu. Dlatego wartości zmierzone w układzie typu V wykazują znacznie mniejsze wahania w strefie znajdującej się najbliżej zasuwy niż wartości zmierzone w układzie typu Z,
- Wraz ze wzrostem odległości przekroju pomiarowego od zasuwy wartości współczynnika  $K_{rz}^*(\alpha, d)$  zbiegają do siebie tj. wartości zmierzone w układzie głowic typu Z stabilizują się na określonym poziomie, wykazują coraz mniejszą zależność od kąta ustawienia głowic  $\alpha$  i zbliżają się do wartości współczynnika  $K_{rz}^*$  wyznaczonych dla pomiarów wykonanych w układzie typu V,
- Porównując ze sobą przebieg zależności dla serii przy  $Re \approx 35\ 000$  i  $Re \approx 70\ 000$  widoczne są analogie w przebiegu zależności  $K_{rz}^*(\alpha, d)$ . Można założyć, że zależność ta jest uniwersalna dla liczb Reynoldsa w zakresie przepływu turbulentnego. Jest to istotne, ponieważ pozwala na dobranie modelu rozkładu prędkości pozwalającego wyznaczyć współczynnik kształtu rozkładu prędkości i przy jego użyciu skompensowanie błędu pomiaru wykonywanego w warunkach niestandardowych, w odległości od przeszkody mniejsza niż wskazana w normach i zaleceniach.

### 6.3 Analiza niepewności pomiarowej ultradźwiękowego pomiaru prędkości

W celu analizy metrologicznej wykonanych serii pomiarowej wykonano obliczenia prowadzące do wyznaczenia niepewności pomiarowej. Zgodnie z [119] niepewność pomiarową definiowana jest jako parametr związany z wartościami (serią) pomiaru danej wielkości fizycznej w stałych warunkach, które można w uzasadniony sposób przypisać wartości mierzonej, i charakteryzujący ich rozrzut w przedziale, wewnątrz którego można z zadowalającym prawdopodobieństwem usytuować wartość wielkości mierzonej. W literaturze przedmiotu znajduje się wiele definicji i sposobów wyznaczania niepewności pomiarowej. [13] [120] [121] [122] [14] [123] [124] Wiele artykułów dotyczy sposobu montażu głowic ultradźwiękowych i jego wpływu na niepewność pomiarową. [125] [74] [126] [33] [52] [45] Wielu badaczy zajmuje się także tematyką wpływu zaburzonego rozkładu prędkości na wynik pomiaru wykonanego przy użyciu przepływomierza ultradźwiękowego. [77] [41] [101] [95] [32] [51] [28] [127]

W niniejszym rozdziale 6.3 zostaną zaprezentowane przykładowe obliczenia niepewności pomiarowej dla serii badań wykonanej przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuwy w układzie głowic ultradźwiękowych V dla przekrojów 3D i 15D zarówno dla  $Re \approx 35\ 000$  i  $Re \approx 70\ 000$ . Poniżej zaprezentowano wartości pomiarów prędkości wykonanych przepływomierzem ultradźwiękowym Endress+Hauser Prosonic Flow 93T, usytuowanym za zasuwą nożową. Taki wybór danych pozwolił porównać serie pomiarowe wykonane w przekrojach o najmocniejszym (3D) i najsłabszym (15D) zaburzeniu przepływu spowodowanym przez zasuwę. Przedstawiona poniżej Tabela 6.99 przedstawia ustawienia kalibracyjne interfejsu przepływomierza dla obu serii pomiarowych.

Tabela 6.99. Parametry kalibracyjne przepływomierza ultradźwiękowego Endress+Hauser Prosonic Flow 93T w warunkach wykonywania pomiaru.

Parametry dla serii pomiarowej:		Re ≈ 35 000	Re ≈ 70 000
Grubość ścian	[mm]	5	5
Średnica rurociągu	[mm]	60	60
Prędkość dźw. w rurze	[m/s]	2400	2400
Prędkość dźw. w płynie	[m/s]	1451	1453
Temperatura	[°C]	9,5	10,0
Odległość czujników	[mm]	89,67	89,73

Jak opisano w rozdziale 5.2, pomiary w danym punkcie pomiarowym zostały wykonane w seriach pomiarowych trwających 5 minut z czasem uśredniania zapisu prędkości 5 sekund. Dla każdego punktu pomiarowego (kąta) otrzymano więc 60 wartości zmierzonych prędkości, z których wyznaczono średnie prędkości dla kątów pomiarowych zaprezentowane na wykresach w rozdziałach 6.1 - 6.2.

Rozszerzoną niepewność pomiarową wyznaczono metodą analityczną w oparciu o standardy GUM [119] oraz JCGM [128] [129] [130] [131] [132] [133] przez obliczenie niepewności złożonej zawierającej jako składowe niepewności typu A i typu B. Alternatywną metodą wyznaczenia niepewności pomiarowej mogą stanowić obliczenia oparte o algorytm metody Monte Carlo. [128] [34] [134] [135]

Niepewność typu A  $u_A(v)$  (6.1) wyznaczono na podstawie rozrzutu wyników wokół wartości średniej prędkości, który jest zgodny z rozkładem normalnym (Gaussa). Miarą rozrzutu wyników jest odchylenie standardowe średniej  $\sigma_{v_{sr}}$ .

$$u_A = \sigma_{v_z} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=60} (v_{z_i} - \bar{v}_z)^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (6.1)$$

Przy wyznaczeniu niepewności typu B posłużono się informacjami o błędach przyrządu pomiarowego - przepływomierza ultradźwiękowego Endress+Hauser Prosonic Flow 93T. Zgodnie z dokumentacją techniczną [82] tego przepływomierza błąd graniczny, tj. maksymalny błąd pomiaru w punkcie pomiarowym [13] [14], określony jest jako suma błędu urządzenia pomiarowego  $\delta_{urz}$  (6.2) i błędu instalacji głowic ultradźwiękowych  $\delta_{inst}$  (6.3). [126] [33] [47]

$$\delta_{urz} = 0,5\% \cdot v_{sr} \pm 7,5 \frac{mm}{s} = 0,5\% \cdot v_{sr} \pm 0,0075 \frac{m}{s} \quad (6.2)$$

$$\delta_{inst} = 1,5\% \cdot v_{sr} \quad (6.3)$$

Błąd graniczny wynosi więc (6.4), a niepewność typu B dana jest wzorem (6.5) zgodnie z prostokątnym rozkładem prawdopodobieństwa:

$$\delta_{gr} = \delta_{urz} + \delta_{inst} = 2\% \cdot v_{\dot{s}r} \pm 0,0075 \text{ m/s} \quad (6.4)$$

$$u_B = \frac{\delta_{gr}}{\sqrt{3}} = \frac{2\% \cdot v_{\dot{s}r} \pm 0,0075 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\sqrt{3}} \quad (6.5)$$

Ostatecznie niepewność całkowitą pomiaru możemy zapisać wzorem (6.6)

$$u(v_z) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=60} (v_z - \bar{v}_z)^2}{n \cdot (n-1)} + \left( \frac{2\% \cdot \bar{v}_z}{\sqrt{3}} + \frac{0,0075}{\sqrt{3}} \right)^2} \quad (6.6)$$

Niepewność rozszerzoną prędkości przepływu  $v_z$  wyznaczono dla przyjętego przedziału ufności  $P=95\%$ . Dominującą składową niepewności całkowitej jest niepewność typu B  $u_B$  dlatego na podstawie [13] przyjęto współczynnik rozszerzenia  $k_r$  (6.7). Finalnie niepewność rozszerzona przyjmuje postać (6.8). Poniżej, w Tabelach 6.100-6.103 zamieszczono obliczone wartości niepewności rozszerzonej  $U(v_z)$  i niepewności względnej  $\frac{U(v_z)}{v_z}$ .

$$k_r = k_B \cdot p = \sqrt{3} \cdot 0,95 = 1,65 \quad (6.7)$$

$$U(v) = k \cdot u(v_z) = 1,65 \cdot u(v_z) \quad (6.8)$$

Tabela 6.100. Rezultaty wyznaczenia niepewności pomiarowej mierzonej prędkości dla przekroju pomiarowego 3D przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$ .

3D $Re \approx 35\ 000$													
$\alpha$	$^\circ$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
$v_{z,\dot{s}r}$	m/s	0,874	0,887	0,886	0,872	0,895	0,901	0,916	0,903	0,897	0,883	0,889	0,899
$u_a$	m/s	0,003	0,003	0,002	0,004	0,003	0,003	0,004	0,004	0,003	0,003	0,002	0,003
$u_b$	m/s	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,026	0,026	0,026	0,025	0,025	0,025	0,025
$U(v_z)$	m/s	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,043	0,043	0,042	0,042	0,042	0,042
$U(v_z)/v_z$	%	4,76	4,74	4,72	4,77	4,72	4,72	4,71	4,72	4,71	4,73	4,71	4,71

Tabela 6.101. Rezultaty wyznaczenia niepewności pomiarowej mierzonej prędkości dla przekroju pomiarowego 15D przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$ .

15D $Re \approx 35\ 000$													
$\alpha$	$^\circ$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
$v_{z,\dot{s}r}$	m/s	0,919	0,920	0,923	0,917	0,919	0,918	0,917	0,911	0,921	0,924	0,922	0,925
$u_a$	m/s	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
$u_b$	m/s	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026
$U(v_z)$	m/s	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,042	0,043	0,043	0,043	0,043
$U(v_z)/v_z$	%	4,65	4,65	4,64	4,65	4,65	4,65	4,65	4,66	4,65	4,64	4,65	4,64



Tabela 6.102. Rezultaty wyznaczenia niepewności pomiarowej mierzonej prędkości dla przekroju pomiarowego 3D przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$ .

3D $Re \approx 70\ 000$													
$\alpha$	$^\circ$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
$v_{z\_sr}$	m/s	1,683	1,671	1,677	1,694	1,717	1,729	1,735	1,710	1,696	1,692	1,690	1,698
$u_a$	m/s	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,006	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004
$u_b$	m/s	0,041	0,041	0,041	0,041	0,042	0,042	0,042	0,042	0,041	0,041	0,041	0,041
$U(v_z)$	m/s	0,068	0,068	0,068	0,069	0,069	0,070	0,070	0,069	0,069	0,069	0,068	0,069
$U(v_z)/v_z$	%	4,06	4,06	4,06	4,05	4,04	4,03	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05

Tabela 6.103. Rezultaty wyznaczenia niepewności pomiarowej mierzonej prędkości dla przekroju pomiarowego 15D przy przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$ .

15D $Re \approx 70\ 000$													
$\alpha$	$^\circ$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
$v_{z\_sr}$	m/s	1,735	1,736	1,746	1,729	1,775	1,757	1,761	1,753	1,752	1,762	1,761	1,757
$u_a$	m/s	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
$u_b$	m/s	0,042	0,042	0,042	0,042	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043
$U(v_z)$	m/s	0,070	0,070	0,070	0,069	0,071	0,070	0,071	0,070	0,070	0,071	0,071	0,070
$U(v_z)/v_z$	%	4,01	4,01	4,01	4,02	4,00	4,01	4,00	4,01	4,01	4,00	4,00	4,00

Przy analizie danych zamieszczonych w Tabelach 6.100-6.103 zauważalna jest mniejsza wartość względnej niepewności pomiarowej dla pomiarów wykonanych przy większym liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$ . Zarówno dla serii pomiarowej wykonanej przy  $Re \approx 35\ 000$ , jak i serii pomiarowej wykonanej przy  $Re \approx 70\ 000$  mniejsze wartości niepewności zanotowane zostały dla większej odległości od zasuw. Jest to w pełni uzasadnione i logiczne, ponieważ w odległości 15D wartości mierzone wykazują mniejszy rozrzut wokół wartości średniej niż w odległości 3D, gdzie występują mocniejsze zaburzenia przepływu i większe wahania wartości prędkości. Należy zauważyć, że we wszystkich seriach pomiarowych dominującym składnikiem niepewności całkowitej pomiaru jest niepewność typu B, związana z dokładnością wskazań przyrządu pomiarowego. Niewielka wartość niepewności typu A świadczy o tym, że ilość pomiarów wykonywanych w ramach 1 serii pomiarowej jest wystarczająca. Względna niepewność rozszerzona dla wszystkich serii pomiarowych mieści się w przedziale (4% , 5%).

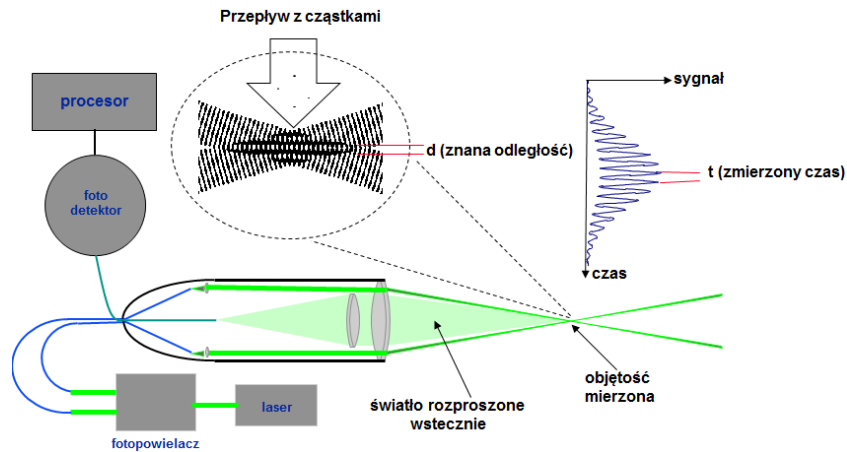
## 7. Wykorzystanie anemometrii laserowej (LDA) do identyfikacji rozkładu prędkości

Pomiar prędkości z wykorzystaniem przepływomierza ultradźwiękowego dostarcza jedynie informację o uśrednionej wartości prędkości w danym przekroju pomiarowym, po drodze przejścia fali ultradźwiękowej. Droga fali ultradźwiękowej jest zależna od wybranego układu położenia głowic ultradźwiękowych. Użycie przepływomierza wielodrogowego pozwala na lepsze uśrednienie prędkości dla przekroju pomiarowego, lecz w dalszym ciągu nie pozwala na stworzenie profilu prędkości, ponieważ nie posiadamy informacji o prędkości płynu w poszczególnych punktach przekroju pomiarowego.

Jednym z założeń pracy było dopasowanie teoretycznego modelu rozkładu prędkości do rzeczywistego rozkładu prędkości za zasuwą nożową. Żeby taki rozkład stworzyć potrzebna jest wiedza na temat prędkości punktowej/miejscowej płynu. Wartości prędkości w poszczególnych punktach przekroju rurociągu można uzyskać posługując się metodą anemometrii laserowej (LDA). [136] [137] [138] [139] [72] [38]

Badania prowadzona przy użyciu anemometru laserowego kwalifikują się do grupy bezkontaktowych pomiarów optycznych. Pomiar odbywa się bezkontaktowo, bez ingerencji w strukturę przepływu. Ponadto wartość prędkości jest niezależna od zmian ciśnienia, temperatury, a więc również gęstości płynu. Prędkość cząsteczek płynu jest uzależniona jedynie od zmian częstotliwości promieniowania, co opisano poniżej. Anemometria laserowa cechuje się wysoką dokładnością, co przekłada się na wysoką cenę aparatury pomiarowej. Z tego względu pomiary LDA przeprowadzone są do celów badawczych, naukowych. Przy użyciu anemometru laserowego można wykonywać pomiary prędkości w przepływach turbulentnych czy pulsacyjnych. [107]

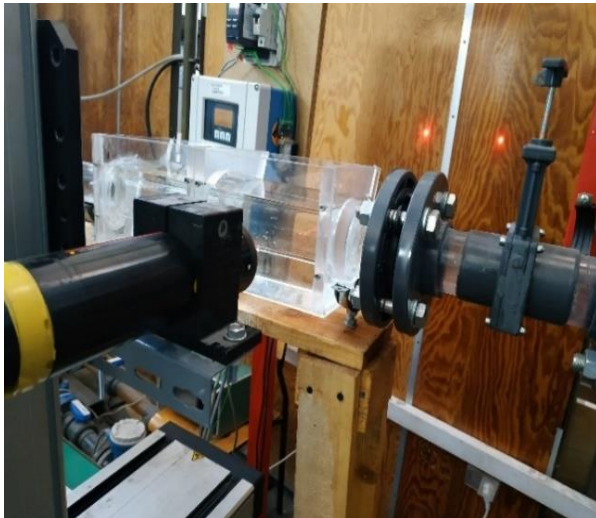
Metoda ta ma na celu pomiar prędkości w konkretnym punkcie, w którym przecinają się dwie wiązki lasera tworząc tzw. objętość pomiarową. Poznanie punktowej wartości prędkości jest możliwe dzięki efektowi Dopplera, który wspomniano już wcześniej w rozdziale 3.3 przy omawianiu zasady działania przepływomierza ultradźwiękowego typu Dopplera. W objętości pomiarowej znajduje się materiał wprowadzony do przepływającego płynu jako tzw. posiew. Cząsteczki posiewu rozpraszają promieniowanie emitowane przez laser. Zmiana częstotliwości promieniowania, zgodnie z efektem Dopplera proporcjonalna do prędkości płynu, pozwala na wyznaczenie prędkości płynu. Opisaną zasadę pomiaru ilustruje rys. 7.1.



Rys. 7.1. Schemat przedstawiające zasadę pomiaru prędkości anemometrem laserowym (LDA).

W przypadku pomiarów wykonywanych na potrzeby niniejszej rozprawy jako posiewu użyto miki mielonej, posiadającej odpowiedni rozmiar (rozdrobienie) i właściwości pożądane w przypadku materiału rozpraszającego (nierozpuszczalność, trwałość, lekkość materiału). Pomiarzy zostały wykonane z użyciem układu nadążnego (trawersu) rys, 7.2 b, co umożliwiło zautomatyzowanie pomiarów z użyciem lasera helowo-neonowego typu 1D (rys. 7.2 a), którego specyfikację zamieszczono w tabeli 7.1.

Rys. 7.2 a)



Rys. 7.2 b)



Rys, 7.2 a) Laser helowo-neonowy emitujący wiązkę promieniowania. Rys 7.2 b) Układ nadążny (trawers) zapewniający zmianę pozycji lasera.

Tabela 7.1. Właściwości używanego lasera helowo-neonowego typu 1D

<b>Laser helowo-neonowy typu 1D</b>	
<b>Moc</b>	10 mW
<b>Długość fali</b>	632,8 nm
<b>Rodzaj światła</b>	czerwone
<b>Zakres prędkości</b>	-16 - +80 m/s
<b>Strumień danych</b>	150 próbek/s
<b>Zakres wysokiego napięcia</b>	0 - 2000 V
<b>Natężenie prądu</b>	0 - 2 mA
<b>Temperatura otoczenia pracy</b>	+5 - +40 °C
<b>Wymiary głowicy</b>	
<b>Długość</b>	275 mm
<b>Średnica</b>	60 mm

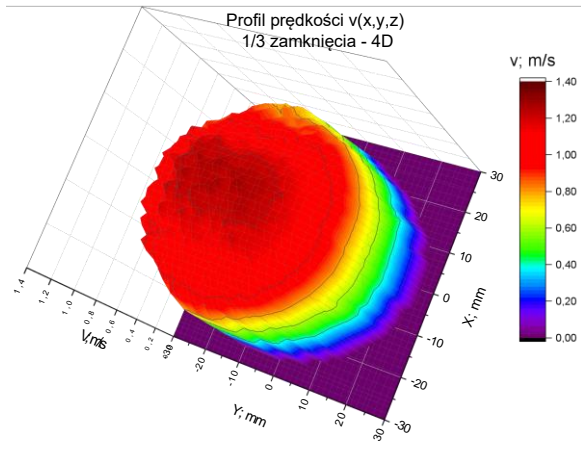
Używany laser typu 1D zapewniał możliwość pomiaru tylko 1 składowej prędkości, tj. zmierzyć prędkość cząstki posiewu tylko w 1 płaszczyźnie. Z powodu tego ograniczenia ustalono algorytm trawersu w taki sposób, żeby poruszał się w obrębie całej wysokości rurociągu (płaszczyzna pionowa Y) w kierunku dół-góra, następnie przesuwał się o ustalony skok trawersu w płaszczyźnie poziomej X i kontynuował skanowanie w płaszczyźnie Y w kierunku góra-dół itd. Kolejne ustawienia lasera w płaszczyźnie Z (odległość od zasowy) odpowiadały kolejnym przekrojom pomiarowym, w których prowadzono badania ultradźwiękowe (3D, 4D, ..., 15D). Zaprogramowany trawers zapewniał przesuwanie lasera zgodnie z siatką punktów stworzoną dla przekroju rurociągu Rys. 4.9. W ten sposób zgromadzono przy użyciu anemometru laserowego Dantec [140] [141] [142] dane pozwalające, przy użyciu programu Origin, na stworzenie profili rozkładu prędkości przepływu rzeczywistego w formie płaskiej (profile 2D) oraz przestrzennej (profile 3D). Istotną z punktu widzenia wiarygodności pomiaru jest liczba próbek  $n$  wykonana w danym punkcie pomiarowym. W ujęciu metrologicznym [13] [14] [124] zapewnienie liczby próbek dążącej do nieskończoności pozwoliłoby uzyskać średnią wartość pomiaru równą wartości prawdziwej wielkości mierzonej. Eksperymentalna liczba próbek została ustawiona na 500, co zapewniło wymaganą liczbę wartości prędkości do wyznaczenia wartości średniej prędkości w danym punkcie.

### 7.1 Prezentacja wyników pomiarów LDA

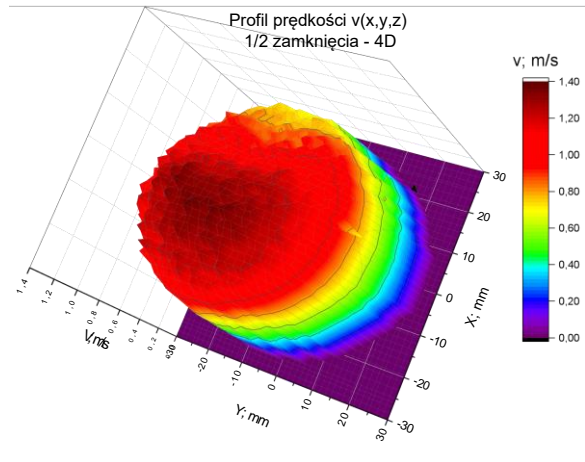
Jak wspomniano powyżej, badania przy użyciu anemometru laserowego (LDA) miały na celu identyfikację rozkładu prędkości za przeszkodą w postaci zasowy nożowej. Podczas wykonywania pomiarów starano się wiernie odwzorować algorytm i warunki wykonywania pomiarów przy użyciu przepływomierza ultradźwiękowego (Rozdział 4). Pomiary anemometrii wykonano dlatego przy 2 różnych wartościach liczby Reynoldsa ( $Re \approx 35\ 000$  i  $Re \approx 70\ 000$ ) i 2 różnych stopniach przymknięcia zasowy (1/3 zamknięcia i 1/2 zamknięcia). Badania wykonane w zakresie odległości 4D - 15D od zasowy pozwoliły na stworzenie profili rozkładu prędkości (2D i 3D). Wykonanie pomiaru w przekroju pomiarowym 3D było niemożliwe ze względu na ograniczenia geometryczne, dlatego pomiary przy użyciu anemometru rozpoczęto w przekroju pomiarowym 4D. Opracowane wyniki pomiarów w formie graficznej przedstawiono poniżej w rozdziałach 7.2-7.7.

## 7.2 Wyniki LDA dla $Re \approx 35\,000$

### 4D $Re \approx 35\,000$

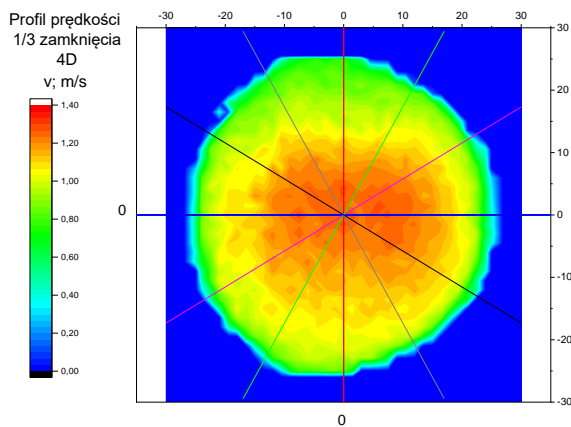


Rys. 7.3. Profil prędkości 3D w przekroju 4D przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw.

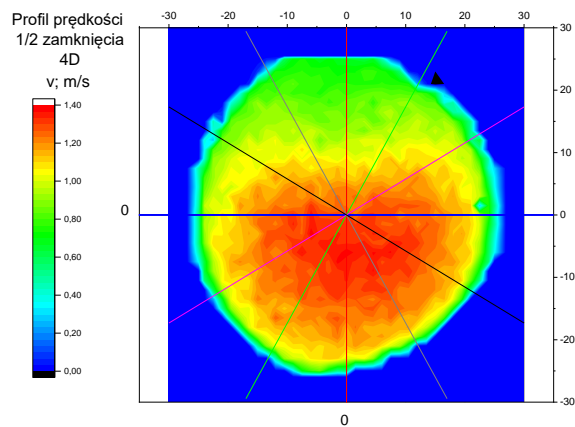


Rys. 7.4. Profil prędkości 3D w przekroju 4D przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw.

### 4D $Re \approx 35\,000$



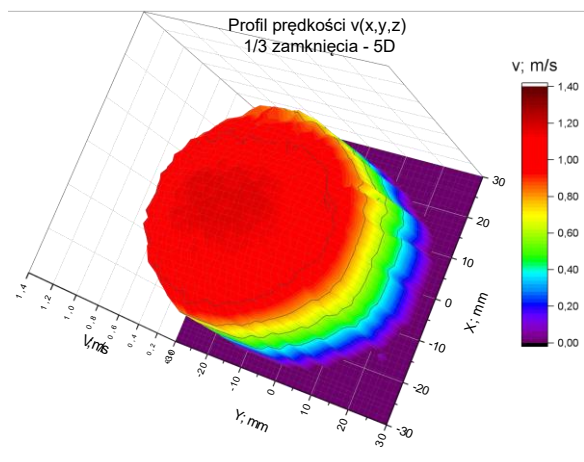
Rys. 7.5. Profil prędkości 2D w przekroju 4D przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw.



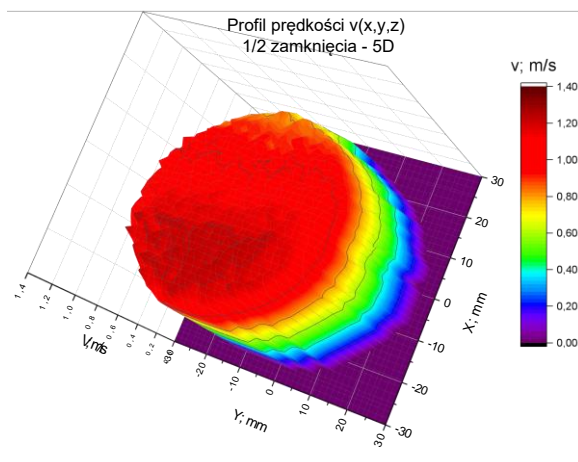
Rys. 7.6. Profil prędkości 2D w przekroju 4D przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw.

Profile prędkości stworzone na podstawie danych z pomiarów anemometrycznych wykonanych dla  $Re \approx 35\,000$  wykazują jeden obszar zwiększonej prędkości, zajmujący około połowy powierzchni profilu. Zachodzą różnice w zakresie umiejscowienia strefy podwyższonej prędkości pomiędzy pomiarami wykonanymi dla 1/2 i 1/3 zamknięcia zasuw. Przy 1/3 zamknięcia zasuw strefa prędkości maksymalnej znajduje się w strefie centralnej profilu prędkości, natomiast w przypadku 1/2 zamknięcia zasuw strefa ta zostaje przesunięta w dół profilu, a maksimum prędkości zwiększa swoją wartość i wyraźniej odbiega od prędkości średniej. Wynika to z większego stopnia przysłonięcia zasuw, a tym samym z większego zaburzenia rozkładu prędkości w przypadku 1/2 zamknięcia zasuw nożowej. Oba profile wykazują symetrię względem osi  $OX$ .

## 5D $Re \approx 35\,000$

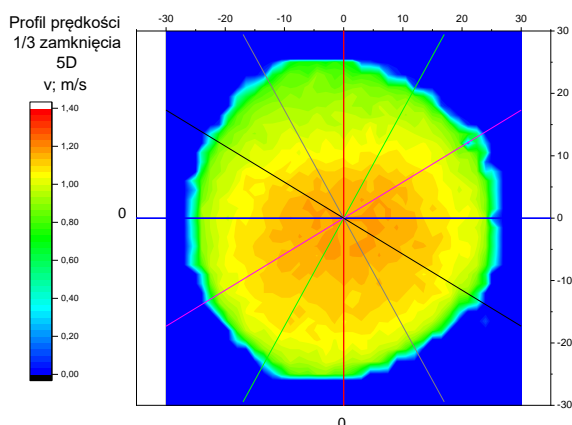


Rys. 7.7. Profil prędkości 3D w przekroju 5D przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw.

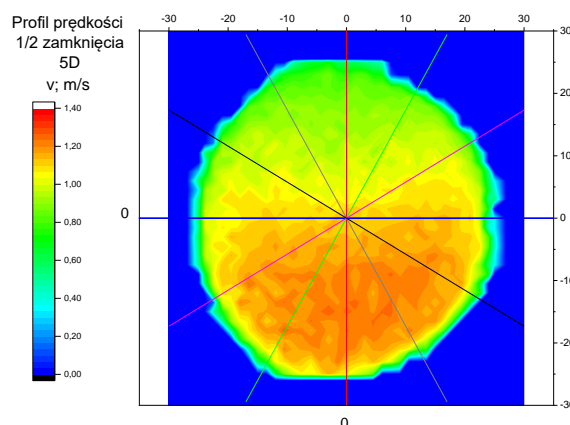


Rys. 7.8. Profil prędkości 3D w przekroju 5D przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw.

## 5D $Re \approx 35\,000$



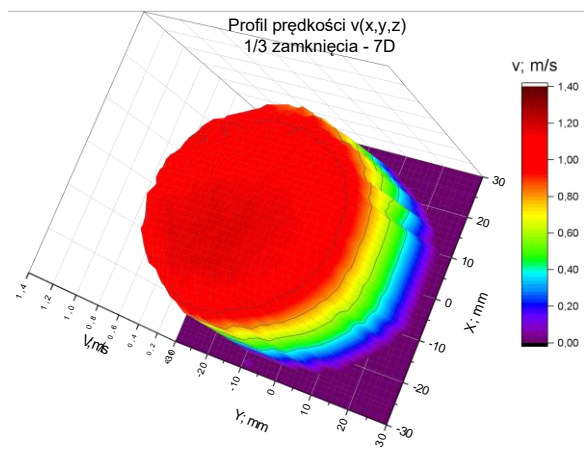
Rys. 7.9. Profil prędkości 2D w przekroju 5D przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw.



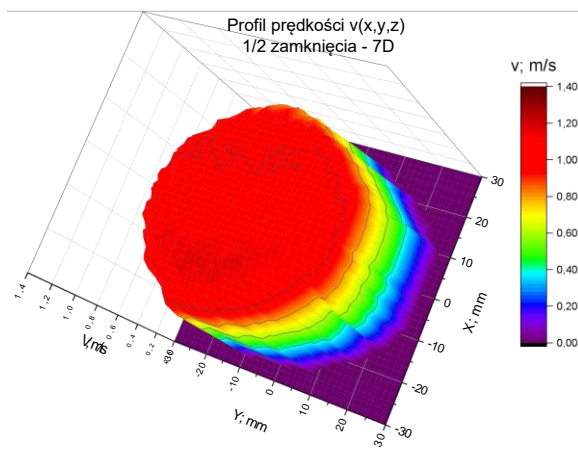
Rys. 7.10. Profil prędkości 2D w przekroju 5D przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw.

Profile prędkości w przekroju pomiarowym 5D wykazują analogiczną strukturę, jak opisane powyżej profile dla przekroju pomiarowego 4D. Maksimum prędkości osiąga znacznie mniejszą wartość niż w przypadku 4D. Świadczy to o dążeniu prędkości do wyrównywania się, jednak w obu przypadkach (dla 1/3 i 1/2 zamknięcia zasuw) w dalszym ciągu mniejszą prędkością wyraźnie odznaczają się strefy, leżące na wysokości, którą zasłaniała zasawa.

## 7D $Re \approx 35\ 000$

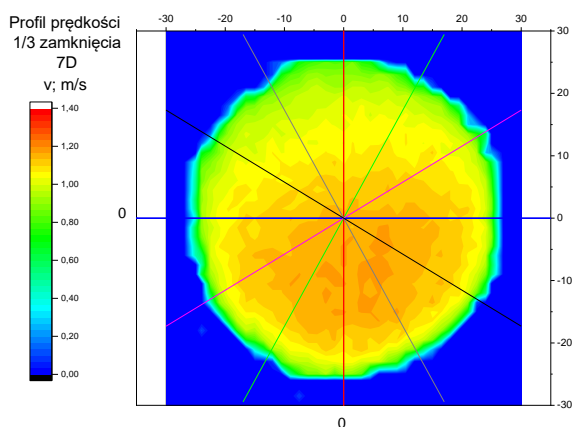


Rys. 7.11. Profil prędkości 3D w przekroju 7D przy zamknięciu 1/3 wysokości zasowy.

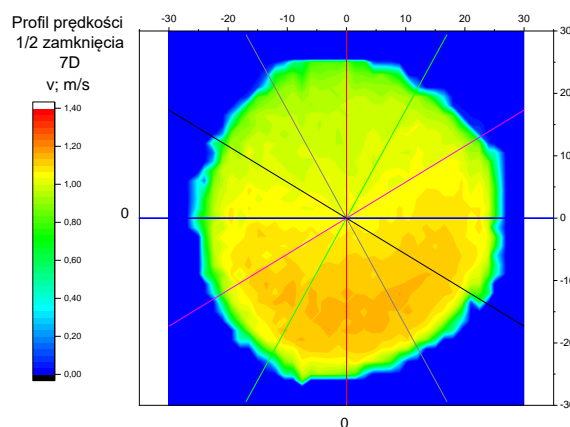


Rys. 7.12. Profil prędkości 3D w przekroju 7D przy zamknięciu 1/2 wysokości zasowy.

## 7D $Re \approx 35\ 000$



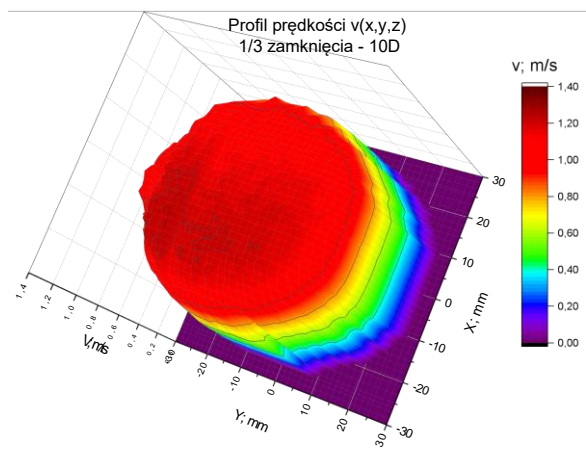
Rys. 7.13. Profil prędkości 2D w przekroju 7D przy zamknięciu 1/3 wysokości zasowy.



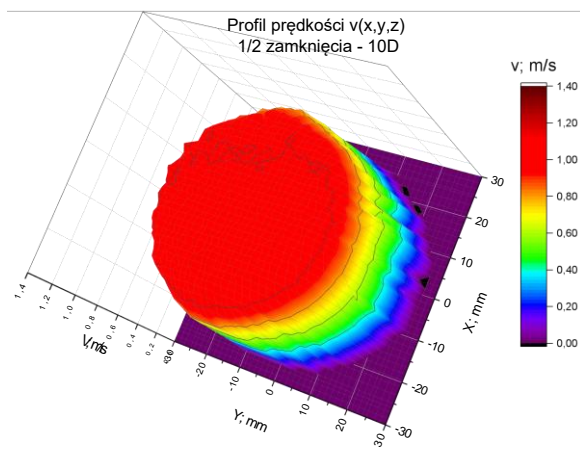
Rys. 7.14. Profil prędkości 2D w przekroju 7D przy zamknięciu 1/2 wysokości zasowy.

W przekroju pomiarowym 7D widać kontynuację procesu wyrównywania się prędkości. Wartość prędkości w strefie podwyższonej prędkości zmniejsza się, dążąc do wartości średniej prędkości. Strefa ta w porównaniu z profilami w odległości od zasowy 4D i 5D przesuwa się w górę profilu i powoduje zmniejszenie się strefy obniżonej prędkości.

### 10D $Re \approx 35\ 000$

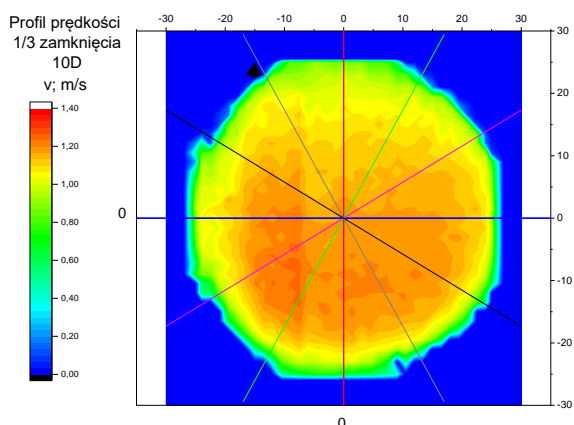


Rys. 7.15. Profil prędkości 3D w przekroju 10D przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw.

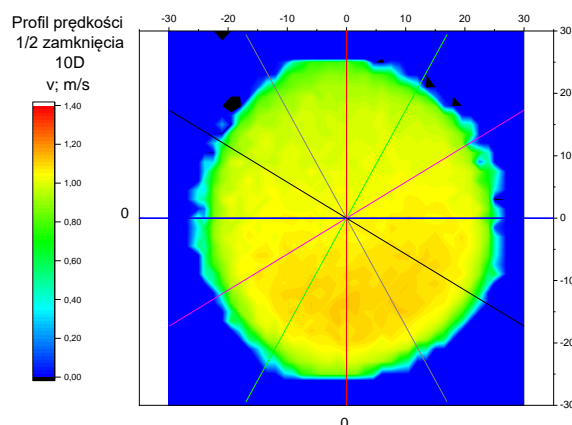


Rys. 7.16. Profil prędkości 3D w przekroju 10D przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw.

### 10D $Re \approx 35\ 000$



Rys. 7.17. Profil prędkości 2D w przekroju 10D przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw.

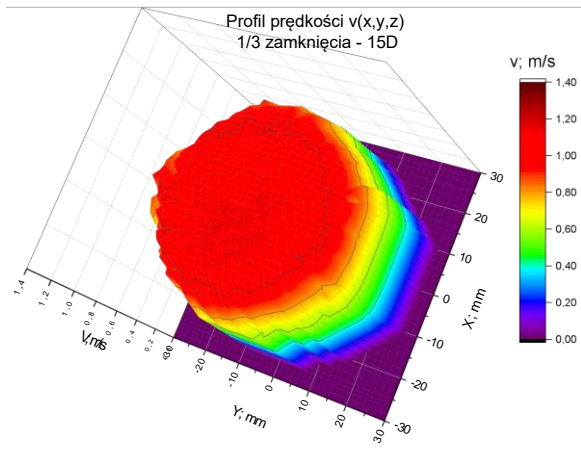


Rys. 7.18. Profil prędkości 2D w przekroju 10D przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw.

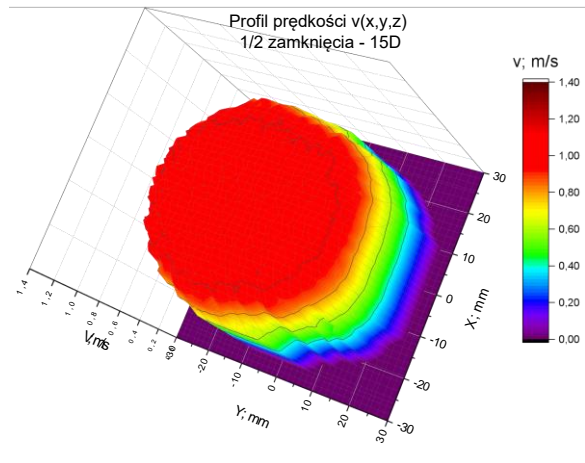
W przekroju pomiarowym 10D dla 1/3 zamknięcia zasuw możemy stwierdzić wyrównanie istniejących w poprzednich przekrojach zaburzeń prędkości, spowodowanych wpływem zasuw nożowej. Profil prędkości wykazuje brak znaczących zniekształceń jego kształtu. Możemy wyróżnić dominującą centralną strefę wyższej prędkości i strefę obniżonej prędkości znajdującą się w pobliżu ścian rurociągu. Wykresy wykonane dla 1/2 zamknięcia zasuw dalej wskazują na zniekształcony charakter profilu prędkości. Widoczna jest strefa mniejszej prędkości na wysokości, którą zasłaniała zasuwa. W porównaniu z poprzednim przekrojem 7D, możemy stwierdzić obniżenie wartości maksimum prędkości, co wskazuje na kontynuację tendencji wyrównywania się prędkości.



## 15D $Re \approx 35\ 000$

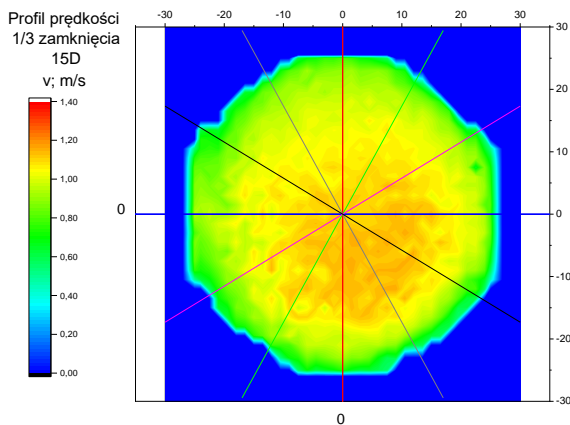


Rys. 7.19. Profil prędkości 3D w przekroju 15D przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw.

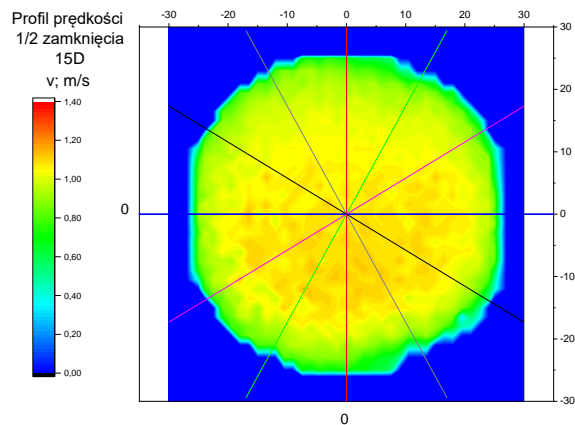


Rys. 7.20. Profil prędkości 3D w przekroju 15D przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw.

## 15D $Re \approx 35\ 000$



Rys. 7.21. Profil prędkości 3D w przekroju 15D przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw.

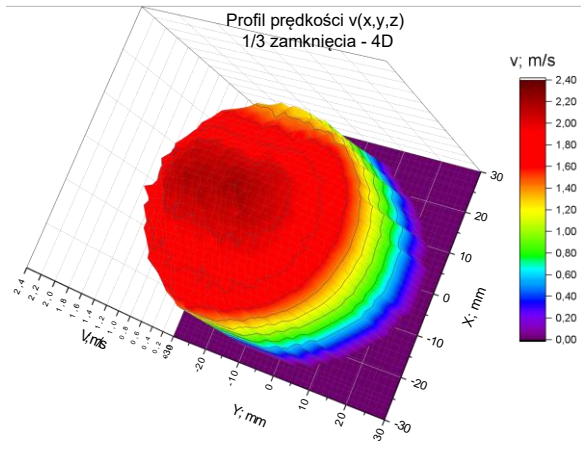


Rys. 7.22. Profil prędkości 3D w przekroju 15D przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw.

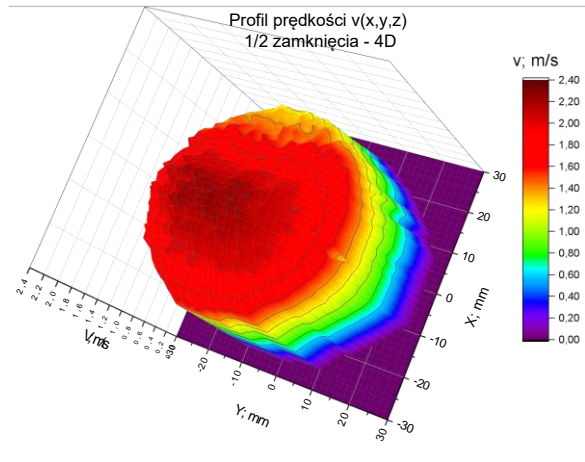
W odległości 15D dla obu stopni zamknięcia zasuw widzimy efekt wcześniejszego wyrównywania się prędkości. Profile prędkości, z wyłączeniem niewielkich wahań wartości prędkości, wykazują się symetrią i jednorodnym kształtem. Dla obu przypadków możemy wyróżnić klasyczne dla uformowanego, ustabilizowanego przepływu turbulentnego szeroką strefę centralną podwyższonej prędkości i strefę przyścienną obniżonej prędkości.

### 7.3 Wyniki LDA dla $Re \approx 70\ 000$

#### 4D $Re \approx 70\ 000$

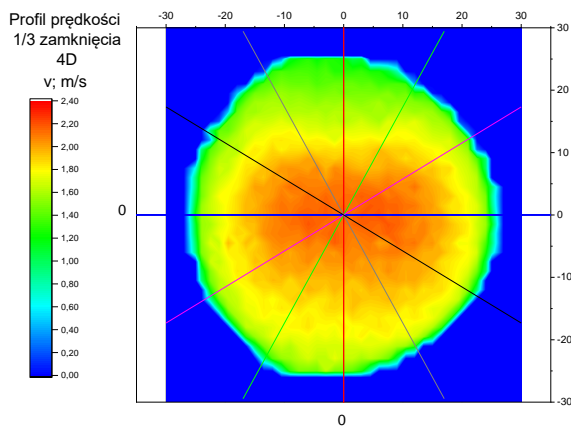


Rys. 7.23. Profil prędkości 3D w przekroju 4D przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw.

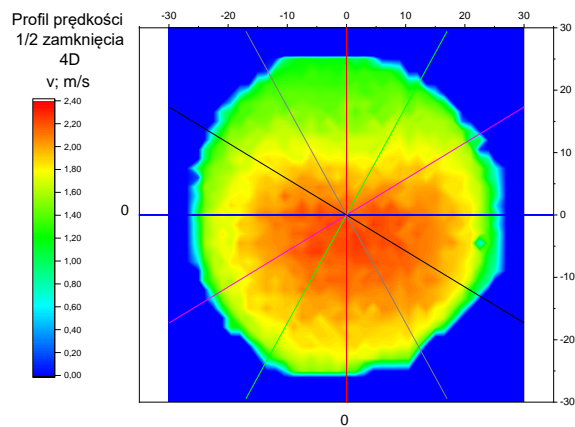


Rys. 7.24. Profil prędkości 3D w przekroju 4D przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw.

#### 4D $Re \approx 70\ 000$



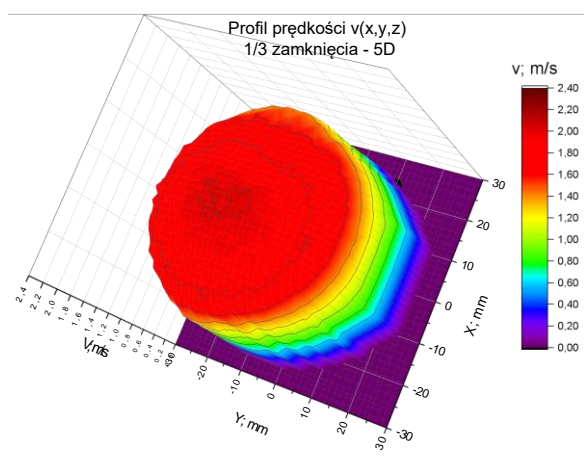
Rys. 7.25. Profil prędkości 2D w przekroju 4D przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw.



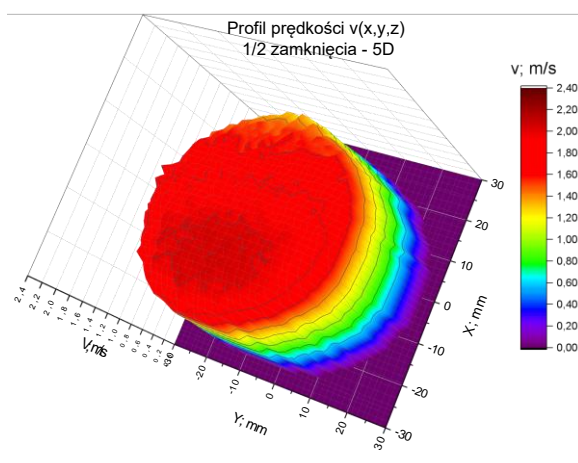
Rys. 7.26. Profil prędkości 2D w przekroju 4D przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw.

Profile prędkości wykonane przy przepływie na poziomie  $Re \approx 70\ 000$  wykazują podobną strukturę, jak profile z serii pomiarowej dla  $Re \approx 35\ 000$ . Wyraźnie zauważalny jest podział na 2 strefy prędkości, które powstały wskutek zaburzeń przepływu spowodowanych wpływem zasuw nożowej. Pierwszą z nich jest strefa zmniejszonej prędkości, której wysokość równa jest bezpośrednio za przeszkodą wysokości zamknięcia zasuw. Jest to wyraźnie widoczne na wykresach (rys. 7.25 i rys. 7.26). Przestrzeń profilu prędkości dopełnia strefa znajdująca się poniżej wysokości zamknięcia zasuw, w której wskutek zwięzienia objętości przepływu wartość prędkości wzrasta. Prędkość przepływu jest w serii wykonanej dla  $Re \approx 70\ 000$  około 2 razy większa niż dla serii dla  $Re \approx 35\ 000$ , co przejawia się bardziej stromą strukturą brył prędkości (rys. 7.27 i rys. 7.28)

### 5D $Re \approx 70\ 000$

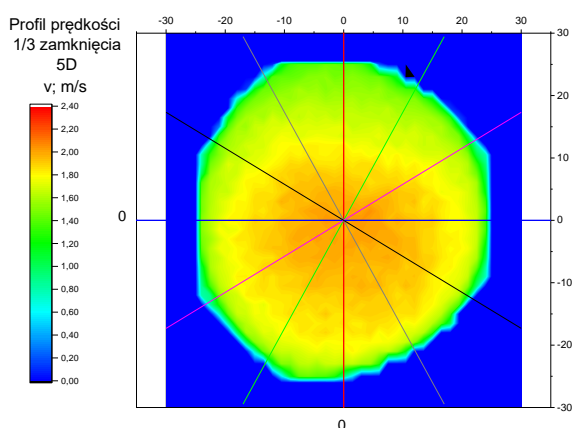


Rys. 7.27. Profil prędkości 3D w przekroju 5D przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw.

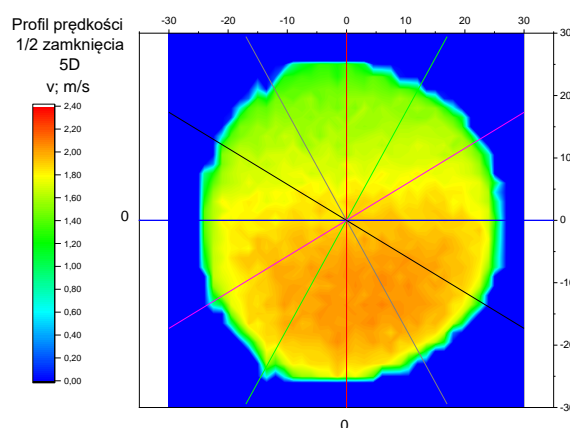


Rys. 7.28. Profil prędkości 3D w przekroju 5D przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw.

### 5D $Re \approx 70\ 000$



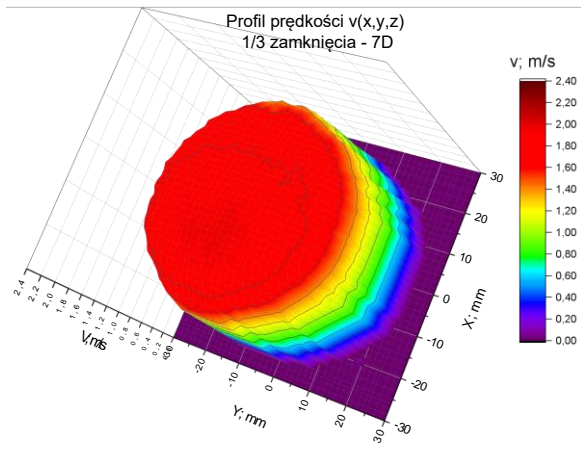
Rys. 7.29. Profil prędkości 2D w przekroju 5D przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw.



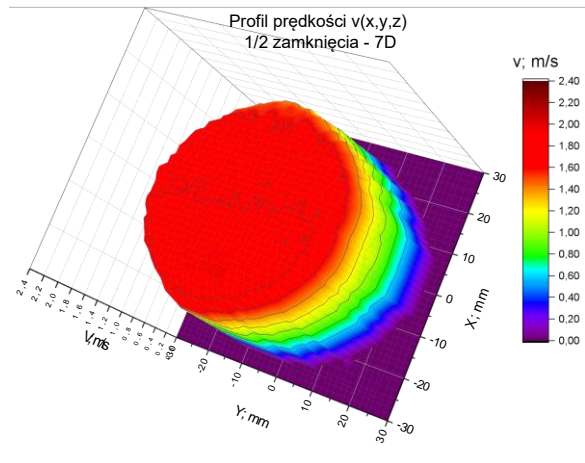
Rys. 7.30. Profil prędkości 2D w przekroju 5D przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw.

Analogicznie jak w przypadku serii wykonanej przy  $Re \approx 35\ 000$ , zamieszczone poniżej profile prędkości wskazują na stopniowe wyrównywanie się zniekształconego przez wpływ zasuw rozkładu prędkości. W porównaniu z profilami dla przekroju pomiarowego 4D zmniejsza się wartość prędkości w obszarze maksimum. Rozmiar stref zwiększonej i obniżonej prędkości pozostają w przybliżeniu stałe.

## 7D $Re \approx 70\,000$

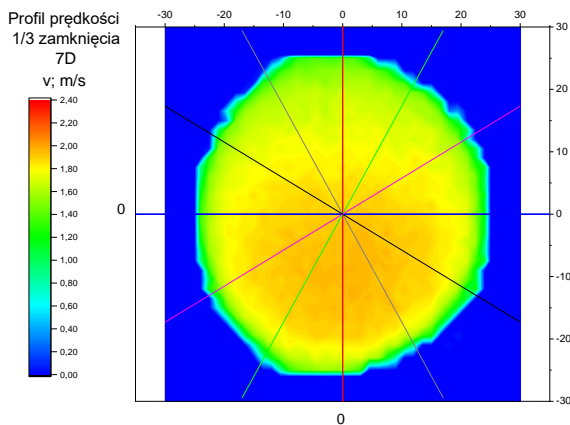


Rys. 7.31. Profil prędkości 3D w przekroju 7D przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw.

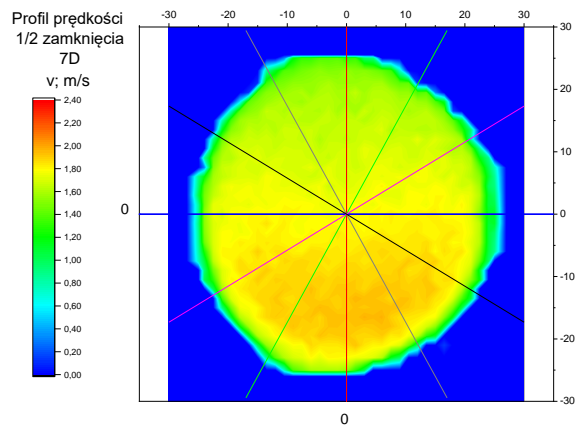


Rys. 7.32. Profil prędkości 3D w przekroju 7D przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw.

## 7D $Re \approx 70\,000$



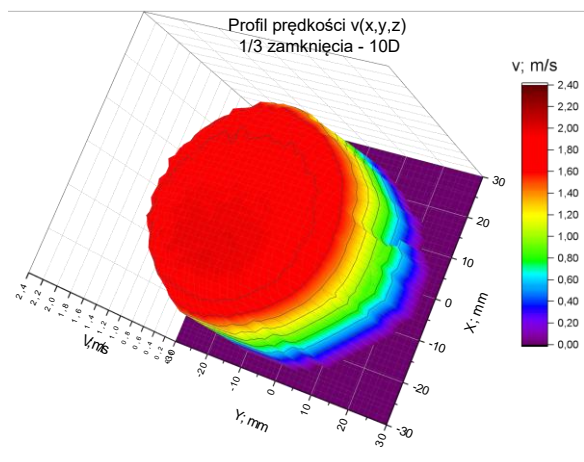
Rys. 7.33. Profil prędkości 2D w przekroju 7D przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw.



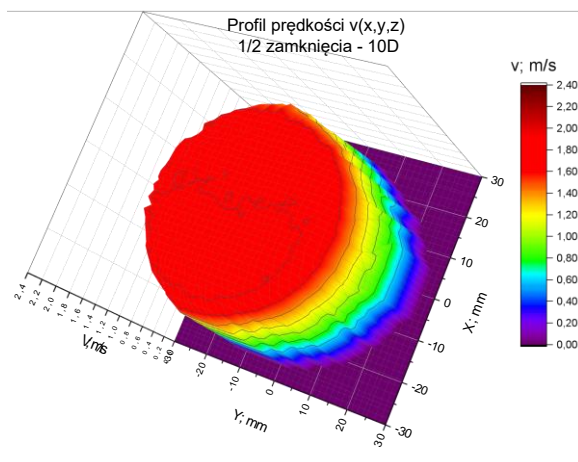
Rys. 7.34. Profil prędkości 2D w przekroju 7D przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw.

W przekroju pomiarowym 7D widać kontynuację procesu wyrównywania się prędkości. Wartość prędkości w strefie podwyższonej prędkości zmniejsza się, dążąc do wartości średniej prędkości.

### 10D $Re \approx 70\ 000$

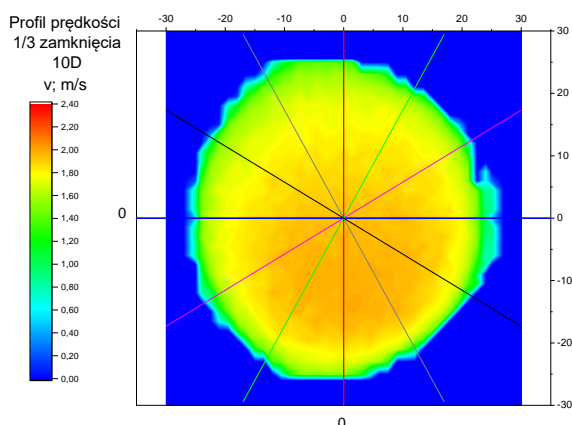


Rys. 7.35. Profil prędkości 3D w przekroju 10D przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw.

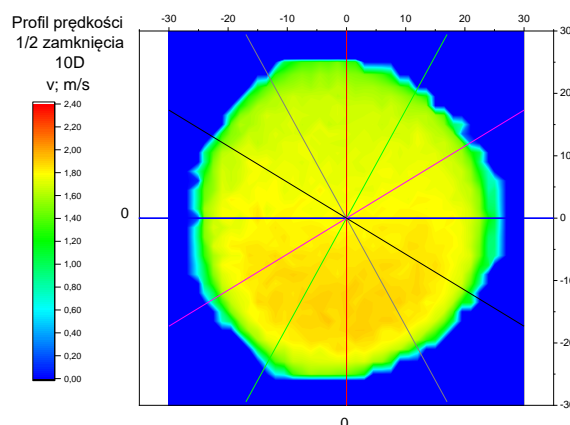


Rys. 7.36. Profil prędkości 3D w przekroju 10D przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw.

### 10D $Re \approx 70\ 000$



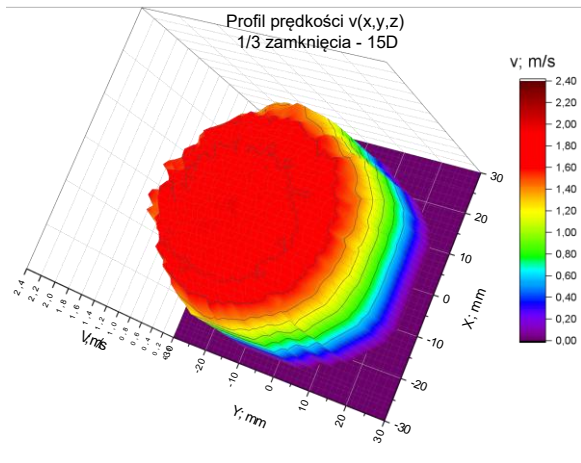
Rys. 7.37. Profil prędkości 2D w przekroju 10D przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw.



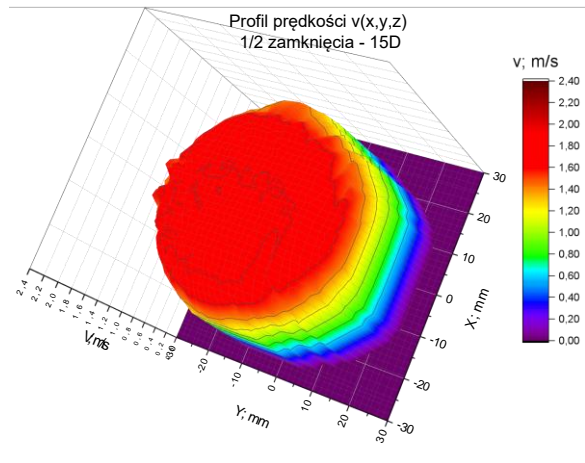
Rys. 7.38. Profil prędkości 2D w przekroju 10D przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw.

W przekroju pomiarowym 10D można stwierdzić ustabilizowanie się przepływu dla serii pomiarowej wykonanej przy 1/3 zasłonięcia zasuw nożowej. Strefa podwyższonej prędkości w porównaniu z profilem dla przekroju pomiarowego 7D wyraźnie przesunęła się ku górze profilu. Profil prędkości dla 1/2 zamknięcia zasuw wskazuje na zniekształcony rozkład prędkości. W dolnej połowie profilu znajduje się strefa podwyższonej prędkości, a w górnej połowie profilu strefa obniżonej prędkości. Dysproporcja w wartościach prędkości w obu strefach w porównaniu z przekrojami 4D, 5D i 7D zmniejsza się.

### 15D $Re \approx 70\ 000$

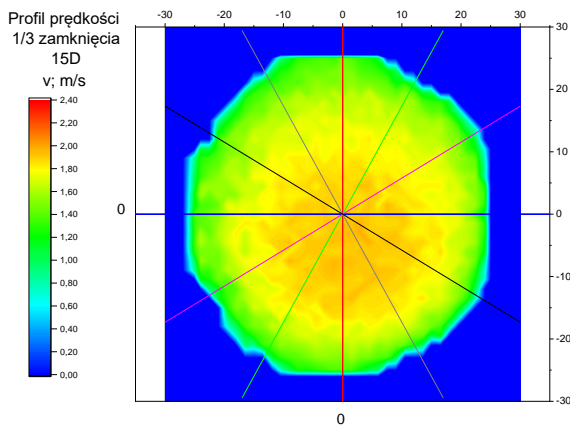


Rys. 7.39. Profil prędkości 3D w przekroju 15D przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw.

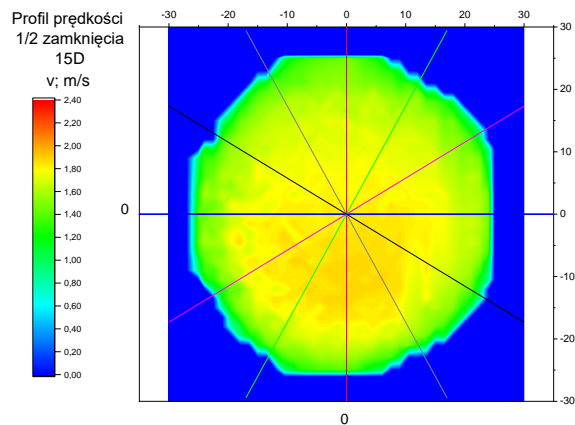


Rys. 7.40. Profil prędkości 3D w przekroju 15D przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw.

### 15D $Re \approx 70\ 000$



Rys. 7.41. Profil prędkości 2D w przekroju 15D przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw.



Rys. 7.42. Profil prędkości 2D w przekroju 15D przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw.

W odległości 15D dla obu stopni zamknięcia zasuw widzimy efekt wcześniejszego wyrównywania się prędkości. Profil prędkości dla 1/3 zamknięcia zasuw, z wyłączeniem niewielkich wahań wartości prędkości, wykazuje się symetrią i jednorodnym kształtem. W profilu prędkości dla 1/2 zamknięcia zasuw widoczna jest różnica w wartościach prędkości między dolną, a górną połową profilu. Świadczy to o ciągłym wpływie zaburzeń, spowodowanych przez zasuwę, które zniekształcają rozkład prędkości. Dla obu przypadków możemy wyróżnić strefę centralną podwyższonej prędkości i strefę przyścienną obniżonej prędkości.

#### 7.4 LDA – analiza wyników dla $Re \approx 35\ 000$ i $Re \approx 70\ 000$

Wyniki pomiaru prędkości przy użyciu LDA zostały użyte, podobnie jak w przypadku danych uzyskanych podczas pomiaru metodą ultradźwiękową, do wyznaczenia wartości współczynnika kształtu rozkładu prędkości  $K_{anem}^*$ . Wyniki obliczeń dla pomiarów wykonanych przy liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$  i  $Re \approx 70\ 000$  zostały zamieszczone w tabelach 7.2 i 7.3 oraz zaprezentowane graficznie na wykresach zależności  $K_{anem}^*(\alpha, d)$ . Wykresy zostały wykonane w tej samej skali osi współrzędnych, aby ułatwić wizualną interpretację wyników.

Tabela 7.2. Zestawienie zbiorcze wartości  $K_{anem}^*(\alpha, d)$  otrzymanych na podstawie wykonanych badań anemometrii laserowej LDA przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw i przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$ .

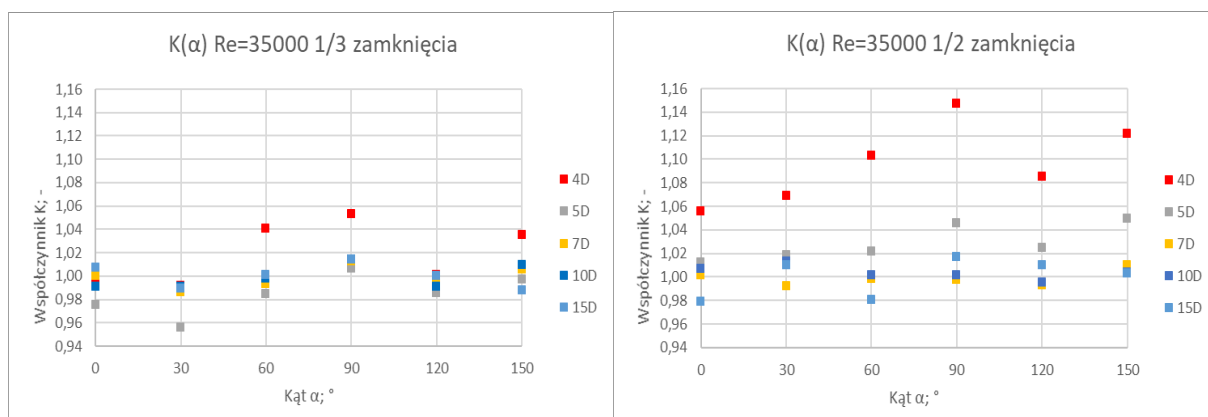
$K_{anem}^*(\alpha, d)$ dla $Re \approx 35\ 000$ 1/3 zamknięcia							
$\alpha; ^\circ$	0	30	60	90	120	150	Kśr
4D	0,997	0,991	1,041	1,053	1,001	1,035	1,020
5D	0,975	0,956	0,985	1,007	0,985	0,997	0,984
7D	1,001	0,986	0,993	1,012	0,994	1,005	0,999
10D	0,991	0,991	0,998	1,014	0,991	1,010	0,999
15D	1,007	0,989	1,001	1,014	1,000	0,988	1,000

Tabela 7.3. Zestawienie zbiorcze wartości  $K_{anem}^*(\alpha, d)$  otrzymanych na podstawie wykonanych badań anemometrii laserowej LDA przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw i przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$ .

$K_{anem}^*(\alpha, d)$ dla $Re \approx 35\ 000$ 1/2 zamknięcia							
$\alpha; ^\circ$	0	30	60	90	120	150	Kśr
4D	1,056	1,069	1,103	1,147	1,085	1,122	1,097
5D	1,013	1,019	1,021	1,046	1,025	1,049	1,029
7D	1,002	0,992	0,998	0,997	0,993	1,010	0,999
10D	1,007	1,013	1,002	1,001	0,995	1,004	1,004
15D	0,979	1,010	0,981	1,017	1,010	1,003	1,000

Analizując dane pomiarowe zestawione w tabelach 7.2 i 7.3 zauważamy wyraźną stabilizację wartości prędkości od przekroju pomiarowego 7D. Zmienność pomiędzy wartościami prędkości dla poszczególnych kątów  $\alpha$  od przekroju pomiarowego jest niewielka i nie przekracza wartości błędu granicznego przepływomierza ultradźwiękowego 2%. Dla mniejszego stopnia zamknięcia zasuw (1/3 zamknięcia), a tym samym dla mniejszego zaburzenia przepływu różnice między wartościami prędkości zarówno w obrębie jednego przekroju pomiarowego oraz pomiędzy kolejnymi przekrojami pomiarowymi są mniejsze. Potwierdza to logiczne przypuszczenia, że przy mniejszym zaburzeniu przepływu jego stabilizacja następuje szybciej. Opisane obserwacje znajdują swoje graficzne odzwierciedlenie na wykresach zależności  $K_{anem}^*(\alpha, d)$  (rys. 7.43 i rys. 7.44).

## Wykresy zbiorcze $Re \approx 35\ 000$



Rys. 7.43. Wykres zależności  $K^*_{anem}(\alpha, d)$  przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw i przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$ .

Rys. 7.44. Wykres zależności  $K^*_{anem}(\alpha, d)$  przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw i przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$ .

Tabela 7.4. Zestawienie zbiorcze wartości  $K^*_{anem}(\alpha, d)$  otrzymanych na podstawie wykonanych badań anemometrii laserowej LDA przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw i przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$ .

$K^*_{anem}(\alpha, d)$ dla $Re \approx 70\ 000$ 1/3 zamknięcia							
$\alpha; ^\circ$	0	30	60	90	120	150	Kśr
4D	1,006	1,013	1,056	1,087	1,026	1,059	1,041
5D	0,994	0,985	1,014	1,023	0,988	1,005	1,001
7D	0,997	0,977	0,988	0,986	0,981	0,981	0,985
10D	1,012	0,989	0,996	0,998	0,999	0,994	0,998
15D	1,006	0,999	1,005	0,999	0,995	0,996	1,000

Tabela 7.5. Zestawienie zbiorcze wartości  $K^*_{anem}(\alpha, d)$  otrzymanych na podstawie wykonanych badań anemometrii laserowej LDA przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw i przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$ .

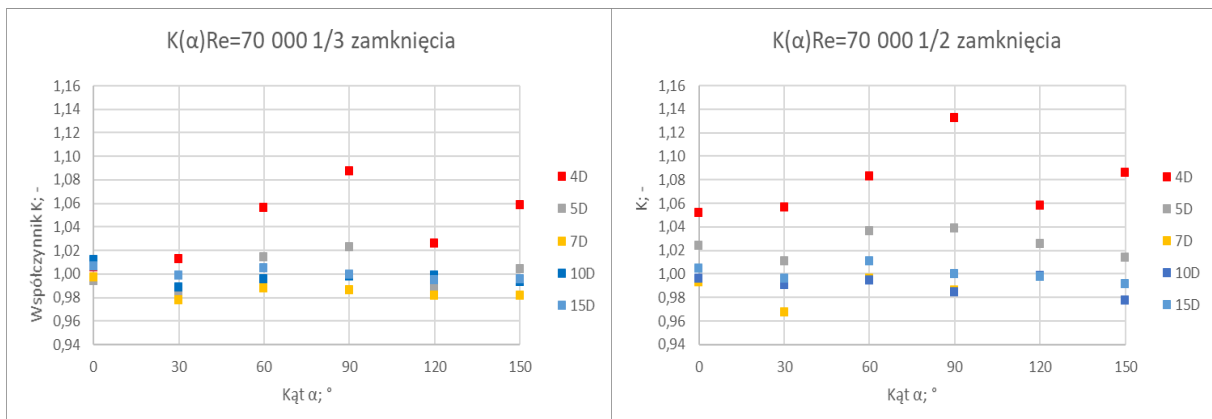
$K^*_{anem}(\alpha, d)$ dla $Re \approx 70\ 000$ 1/2 zamknięcia							
$\alpha; ^\circ$	0	30	60	90	120	150	Kśr
4D	1,052	1,056	1,083	1,133	1,058	1,086	1,078
5D	1,024	1,010	1,036	1,039	1,026	1,014	1,025
7D	0,993	0,967	0,996	0,986	0,998	0,977	0,986
10D	0,996	0,991	0,994	0,985	0,998	0,978	0,990
15D	1,004	0,996	1,011	1,000	0,998	0,992	1,000

Dane zamieszczone w tabelach 7.4 i 7.5 pozwalają na postawienie analogicznych wniosków, jak w przypadku przepływu o liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$ . Świadczy to o tym, że struktura przepływu (rozkład prędkości i wpływ zaburzenia) jest podobna dla przepływów o  $Re \approx 35\ 000$  i  $Re \approx 70\ 000$ . Podobnie jak w przypadku serii dla  $Re \approx 35\ 000$ , zauważalna jest wyraźna stabilizacja prędkości przepływu od przekroju pomiarowego 7D, przy czym wahania wartości prędkości w poszczególnych kątach  $\alpha$  są większe. Prędkość w serii pomiarowej dla około dwukrotnie większych wartości liczby Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$  niż w poprzednio prezentowanej serii  $Re \approx 35\ 000$  jest około dwukrotnie większa. Logiczne jest więc



powstawanie większych zaburzeń przepływu spowodowanych wpływem zasuwy nożowej i wywołana przez to nieznacznie późniejsza stabilizacja profilu prędkości. Przy czym jak stwierdzono powyżej struktura rozkładu prędkości w kolejnych przekrojach pomiarowych jest dla obu serii bardzo podobna. Analogicznie jak w przypadku serii dla  $Re \approx 35\ 000$ , dla mniejszego stopnia zamknięcia zasuwy (1/3 zamknięcia), a tym samym dla mniejszego zaburzenia przepływu różnice między wartościami prędkości zarówno w obrębie jednego przekroju pomiarowego oraz pomiędzy kolejnymi przekrojami pomiarowymi są mniejsze. Potwierdza to logiczne przypuszczenia, że przy mniejszym zaburzeniu przepływu jego stabilizacja następuje szybciej. Opisane obserwacje znajdują swoje graficzne odzwierciedlenie na wykresach zależności  $K_{anem}^*(\alpha, d)$  (rys. 7.45 i rys. 7.46).

### Wykresy zbiorcze $Re \approx 70\ 000$



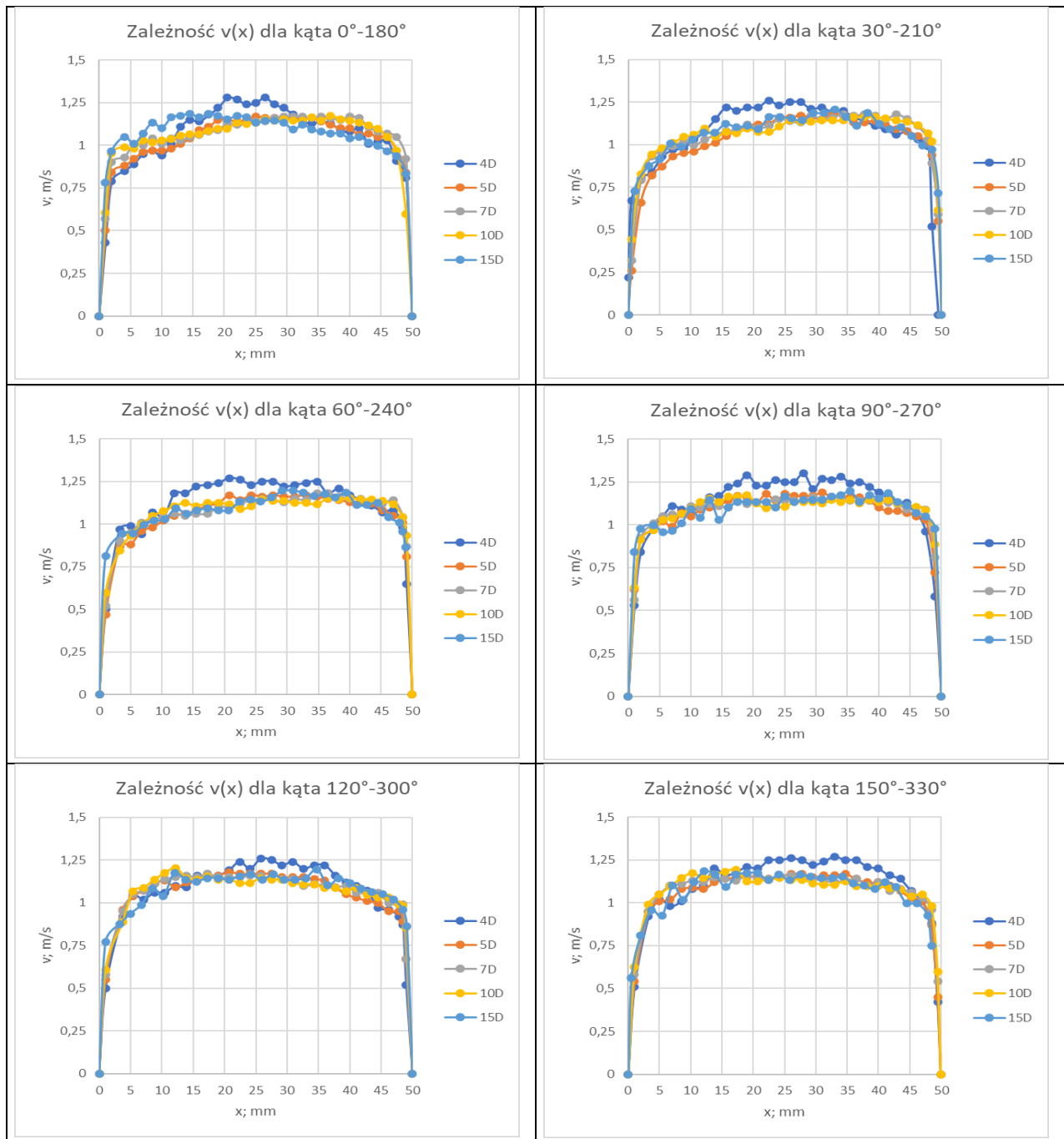
Rys. 7.45. Wykres zależności  $K_{anem}^*(\alpha, d)$  przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuwy i przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re=70\ 000$ .

Rys. 7.46. Wykres zależności  $K_{anem}^*(\alpha, d)$  przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuwy i przepływie o liczbie Reynoldsa  $Re=70\ 000$ .

### 7.5 LDA – rozkłady prędkości dla $Re \approx 35\ 000$ - 1/3 zamknięcia

Poniżej zaprezentowano wykresy rozkładu prędkości  $v(x)$  dla poszczególnych kątów, stworzone na podstawie punktowego pomiaru prędkości metodą LDA. Na wykresach umieszczone zostały dane pomiarowe dla wybranych przekrojów pomiarowych: 4D, 5D, 7D, 10D i 15D. Stworzono wykresy przebiegu zależności dla poszczególnych kątów  $\alpha$  jak i dla poszczególnych odległości przekroju pomiarowego D od zasuwy nożowej. Analiza przebiegu zależności  $v(x)$  na poniższych wykresach pozwala potwierdzić wcześniejsze obserwacje i stwierdzenia zamieszczone we wnioskach w rozdziałach 7.2-7.4.

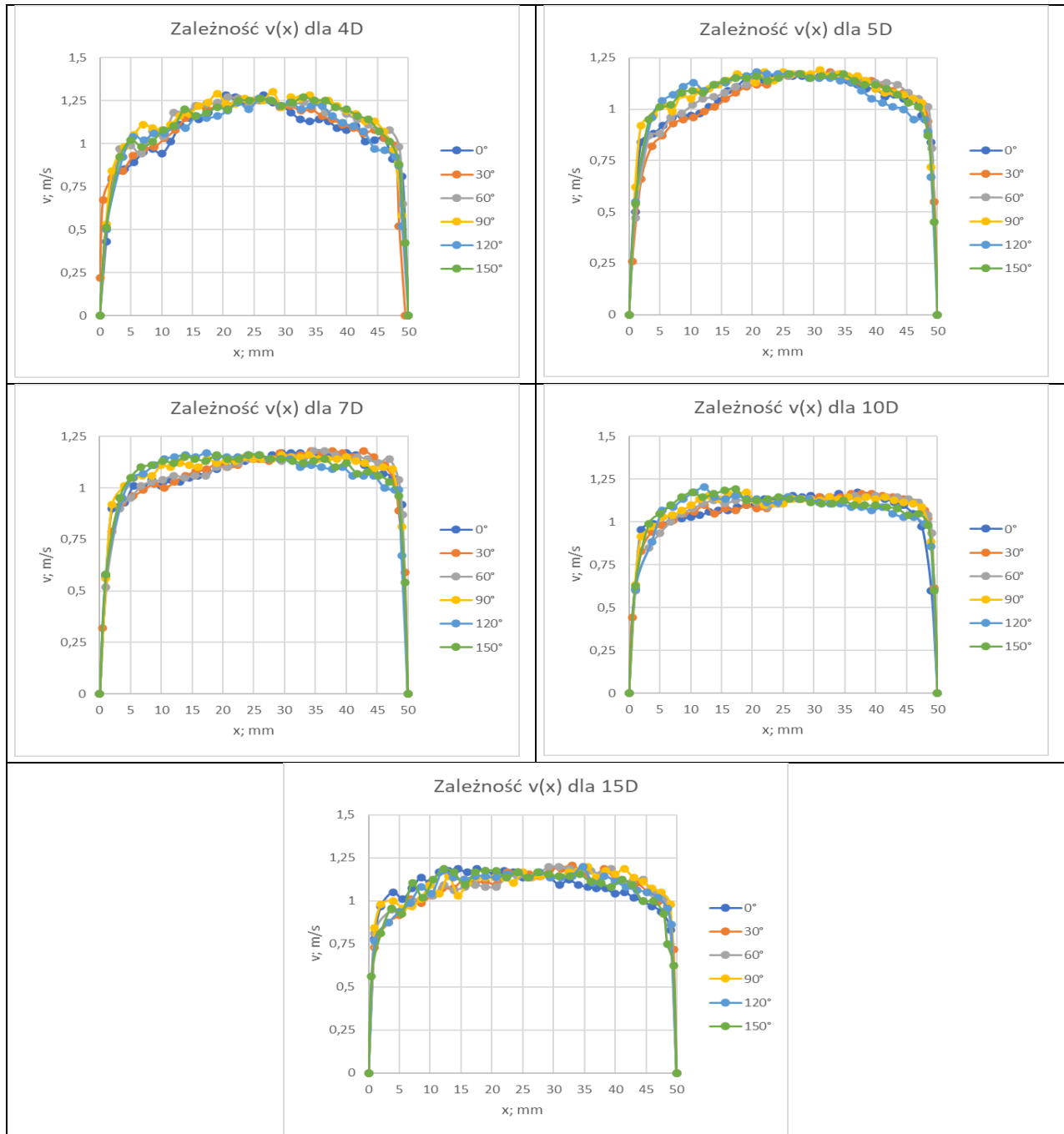
Tabela 7.6. Prezentacja rozkładów prędkości dla przekrojów w poszczególnych kątach  $\alpha$  w serii pomiarowej wykonanej przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw i przepływie liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$ .



Na zamieszczonych w tabeli 7.6 wykresach rozkładu prędkości  $v(x)$  zauważalna jest wyraźna różnica w przebiegu funkcji  $v(x)$  pomiędzy serią pomiarową w przekroju 4D, a pozostałymi seriami. Dla serii 4D wartości prędkości w strefie centralnej profilu są zdecydowanie wyższe niż w przypadku pozostałych serii pomiarowych. Wynika to z silnego zaburzenia przepływu bezpośrednio za zasuwą. Jak już wcześniej stwierdzono w spostrzeżeniach zamieszczonych w rozdziałach 7.2 - 7.4, w przekrojach pomiarowych 7D i dalszych zaobserwowano stabilizację rozkładu prędkości. Należy jednak dodać, że dla tych przekrojów w dalszym ciągu obserwowane są miejscowe przyrosty/spadki wartości prędkości, jak chociażby dla przekroju pomiarowego 10D dla kąta  $120^\circ - 300^\circ$  w zakresie  $x$  (5mm , 12

mm). Miejscowo występujące niewielkie zaburzenia ogólnej tendencji kształtowania się profilu prędkości ustabilizowanego przepływu turbulentnego są wynikiem oddziaływań zasowy nożowej, które słabną wraz ze zwiększeniem odległości przekroju pomiarowego od zasowy.

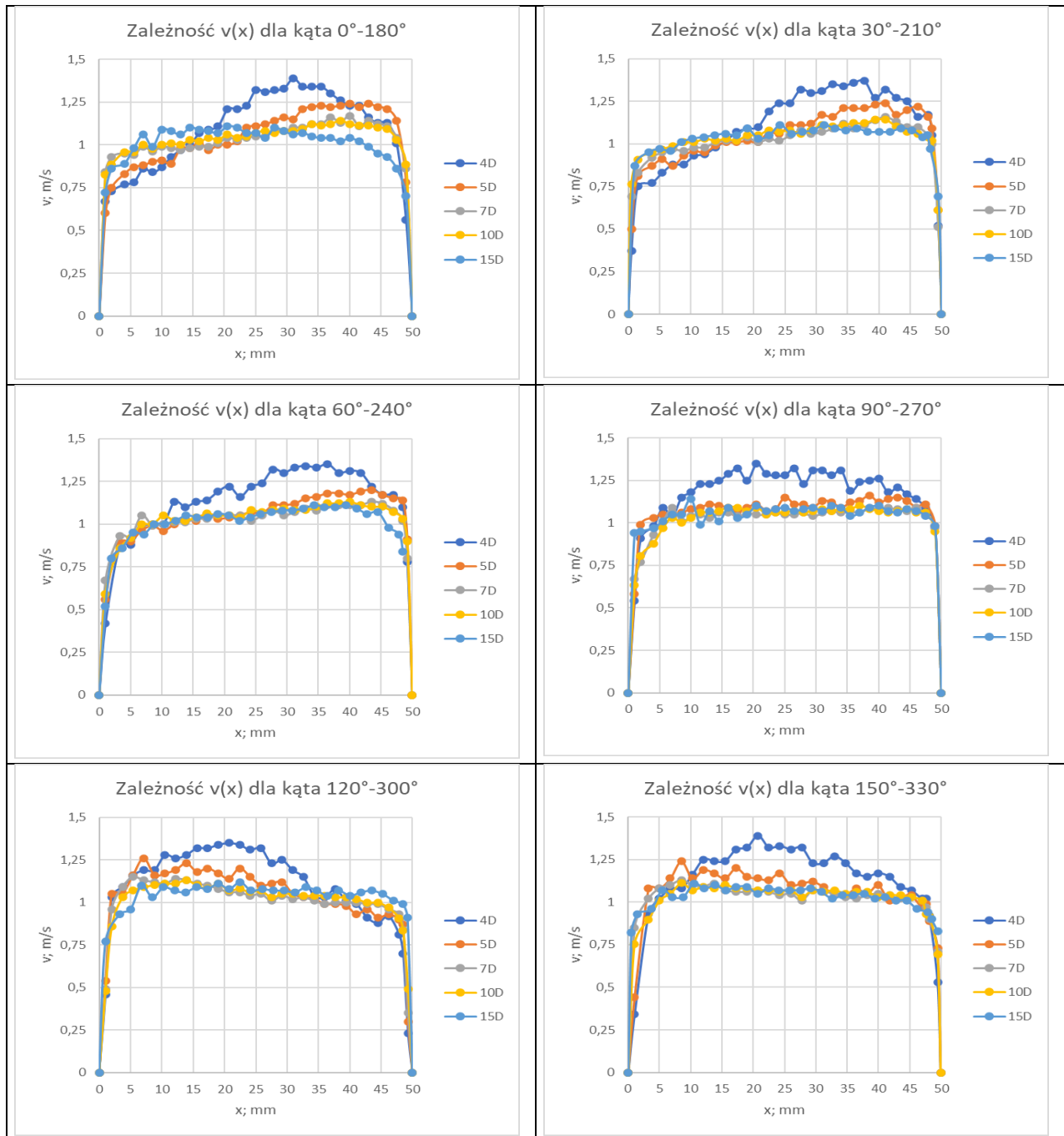
Tabela 7.7. Prezentacja rozkładów prędkości dla wybranych przekrojów pomiarowych z zakresu 4D-15D w serii pomiarowej wykonanej przy zamknięciu 1/3 wysokości zasowy i przepływie liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$ .



Zamieszczone w tabeli 7.7 wykresy wskazują na różnice w przebiegu zależności  $v(x)$  dla różnych kątów  $\alpha$ . Różnice są wynikiem zaburzeń rozkładu prędkości spowodowanego przez zasuwę nożową. Dla wszystkich przedstawionych przekrojów pomiarowych 4D - 15D możemy wyróżnić grupę kątów ( $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ) dla których funkcja  $v(x)$  osiąga maksimum w zakresie  $x$  (5 mm , 15 mm), a w dalszym przebiegu wykazuje tendencję spadkową. Grupa kątów ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ) wykazuje się natomiast umiejscowieniem wartości maksymalnej w zakresie  $x$  (35 mm , 45 mm). W miarę zwiększania odległości przekroju pomiarowego od zasuwy zauważalne jest zmniejszenie różnicy między wartościami maksymalnymi funkcji  $v(x)$ , a wartością średnią osiąganą w rejonie centrum profilu prędkości  $x = 25$  mm. Największe różnice występują dla przekroju 4D, natomiast najmniejsze dla przekroju 15D, dla którego przebieg zależności  $v(x)$  dla wszystkich kątów jest bardzo zbliżony.

## 7.6 LDA – rozkłady prędkości dla $Re \approx 35\ 000$ – 1/2 zamknięcia

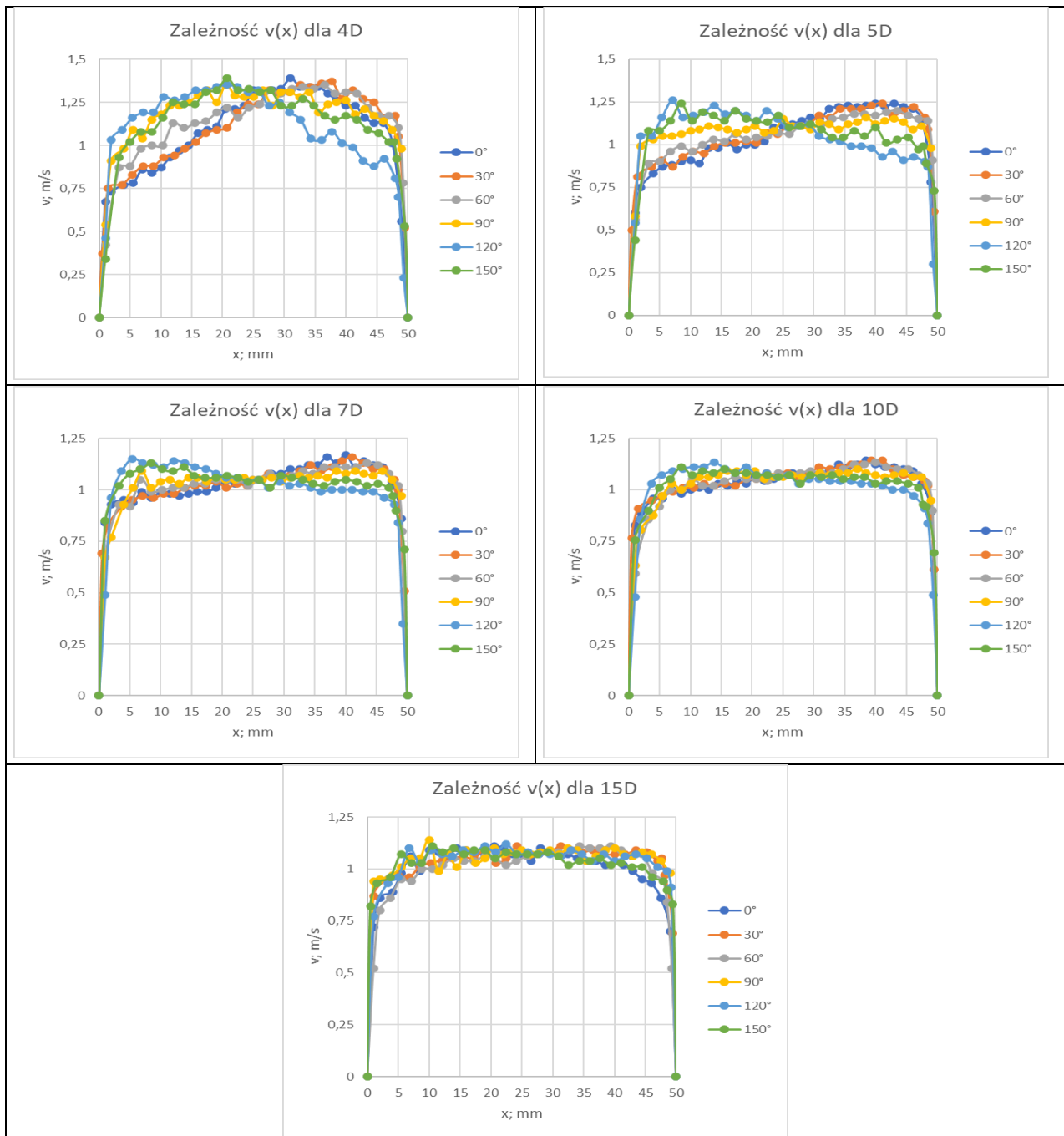
Tabela 7.8. Prezentacja rozkładów prędkości dla przekrojów w poszczególnych kątach  $\alpha$  w serii pomiarowej wykonanej przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw i przepływie liczbie Reynoldsa  $Re=35\ 000$ .



Na zamieszczonych w tabeli 7.8 wykresach rozkładu prędkości  $v(x)$  zauważalne są zdecydowanie większe fluktuacje wartości prędkości niż w przypadku wykresów sporządzonych dla pomiarów wykonanych przy 1/3 zamknięcia zasuw. Różnice pomiędzy seriami pomiarowymi dla przekrojów 4D i 5D, a seriami 7D, 10D, 15D są zdecydowanie wyraźniejsze. Jest to w pełni logiczne, ponieważ większy stopień zamknięcia zasuw powoduje większe zaburzenia struktury przepływu. W Podobnie jak w przypadku 1/3 wysokości

zamknięcia zasuw w przekrojach pomiarowych 7D, 10D, 15D możemy stwierdzić ustabilizowanie rozkładu prędkości, z miejscowo występującymi niewielkimi zaburzeniami. Dla kątów  $0^\circ$ - $180^\circ$ ,  $30^\circ$ - $210^\circ$ ,  $60^\circ$ - $240^\circ$  i  $120^\circ$ - $300^\circ$  wyraźna jest asymetria w przebiegu funkcji  $v(x)$  dla wszystkich przekrojów pomiarowych, przy czym stopień asymetrii rośnie wraz ze wzrostem odległości przekroju od zasuw będącej źródłem zaburzenia. Dla kątów  $90^\circ$ - $270^\circ$  i  $150^\circ$ - $330^\circ$  na zamieszczonych wykresach można zauważyć symetrię wokół centrum profilu  $x = 25\text{mm}$ .

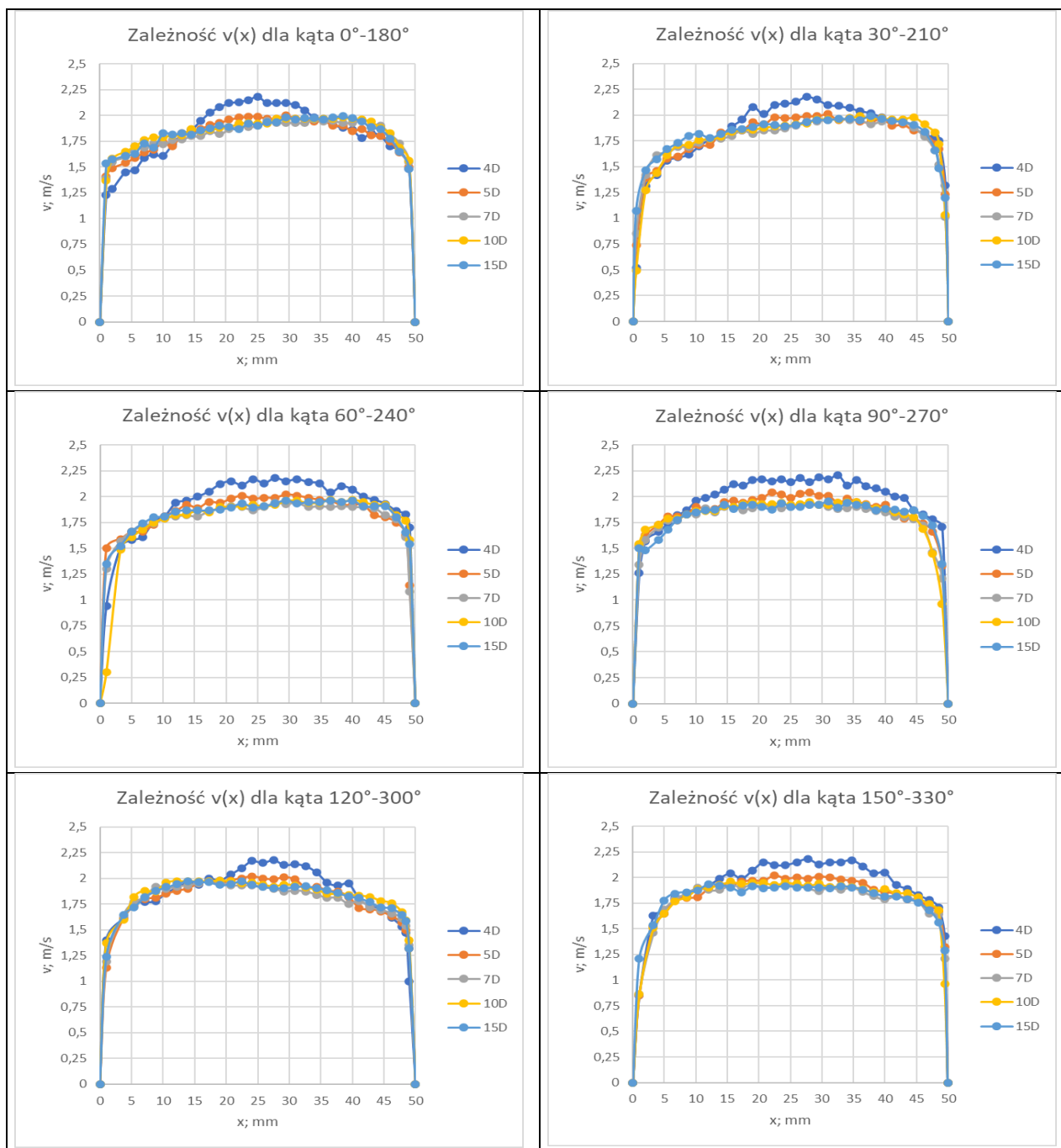
Tabela 7.9. Prezentacja rozkładów prędkości dla wybranych przekrojów pomiarowych z zakresu 4D-15D w serii pomiarowej wykonanej przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw i przepływie liczbie Reynoldsa  $Re \approx 35\ 000$ .



Zamieszczone w tabeli 7.9 wykresy wskazują na różnice w przebiegu zależności  $v(x)$  dla różnych kątów  $\alpha$ . Różnice są wynikiem zaburzeń rozkładu prędkości spowodowanego przez zasuwę nożową i są one większe niż w serii pomiarowej dla 1/3 zamknięcia zasuwy. Dla wszystkich przedstawionych przekrojów pomiarowych 4D - 15D możemy wyróżnić grupę kątów ( $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ) dla których funkcja  $v(x)$  osiąga maksimum w zakresie  $x$  (5 mm , 20 mm), a w dalszym przebiegu wykazuje tendencję spadkową. Grupa kątów ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ) wykazuje się natomiast umiejscowieniem wartości maksymalnej w zakresie  $x$  (35 mm , 45 mm). W miarę zwiększania odległości przekroju pomiarowego od zasuwy zauważalne jest zmniejszenie różnicy między wartościami maksymalnymi funkcji  $v(x)$ , a wartością średnią osiąganą w rejonie centrum profilu prędkości  $x = 25$  mm. Największe różnice występują dla przekroju 4D, natomiast najmniejsze dla przekroju 15D, dla którego przebieg zależności  $v(x)$  dla wszystkich kątów jest bardzo zbliżony.

## 7.7 LDA – rozkłady prędkości dla $Re \approx 70\ 000$ - 1/3 zamknięcia

Tabela 7.10. Prezentacja rozkładów prędkości dla przekrojów w poszczególnych kątach  $\alpha$  w serii pomiarowej wykonanej przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw i przepływie liczb Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$ .

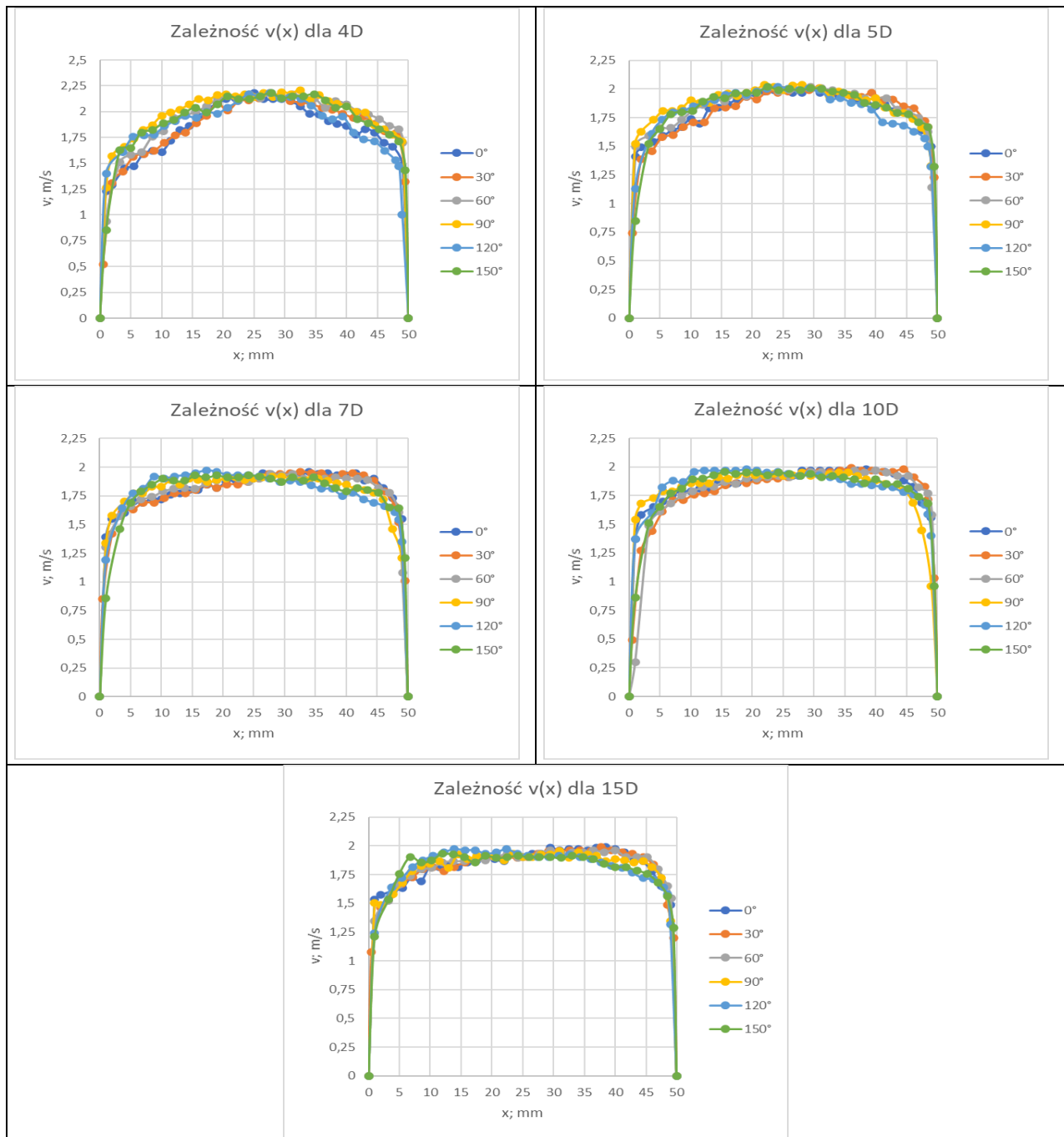


Wykresy zamieszczone w tabeli 7.10 sporządzone dla pomiarów wykonanych przy  $Re \approx 70\ 000$  i 1/3 wysokości zamknięcia zasuw, wykazują analogiczne cechy charakterystyczne jak wykresy dla serii pomiarowej wykonanej przy  $Re \approx 35\ 000$  i 1/3 wysokości zamknięcia zasuw. Świadczy to o podobieństwie rozkładów prędkości, choć wartości prędkości są w przypadku omawianej serii dla  $Re \approx 70\ 000$  prawie 2-krotnie większe. Na zamieszczonych powyżej wykresach rozkładu prędkości zauważalna jest wyraźna różnica w przebiegu funkcji  $v(x)$  pomiędzy serią pomiarową w przekroju 4D, a pozostałymi seriami. Dla serii 4D wartości prędkości w strefie centralnej profilu są zdecydowanie wyższe niż w



przypadku pozostałych serii pomiarowych. Wynika to z silnego zaburzenia przepływu bezpośrednio za zasuwą. W przekrojach pomiarowych 7D i dalszych zaobserwowano stabilizację rozkładu prędkości. Miejscowo występujące niewielkie zaburzenia ogólnej tendencji kształtowania się profilu prędkości ustabilizowanego przepływu turbulentnego są wynikiem oddziaływań zasuwy nożowej, które słabną wraz ze zwiększeniem odległości przekroju pomiarowego od zasuwy.

Tabela 7.11. Prezentacja rozkładów prędkości dla wybranych przekrojów pomiarowych z zakresu 4D-15D w serii pomiarowej wykonanej przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuwy i przepływieo liczbie Reynoldsa  $Re=70\ 000$ .

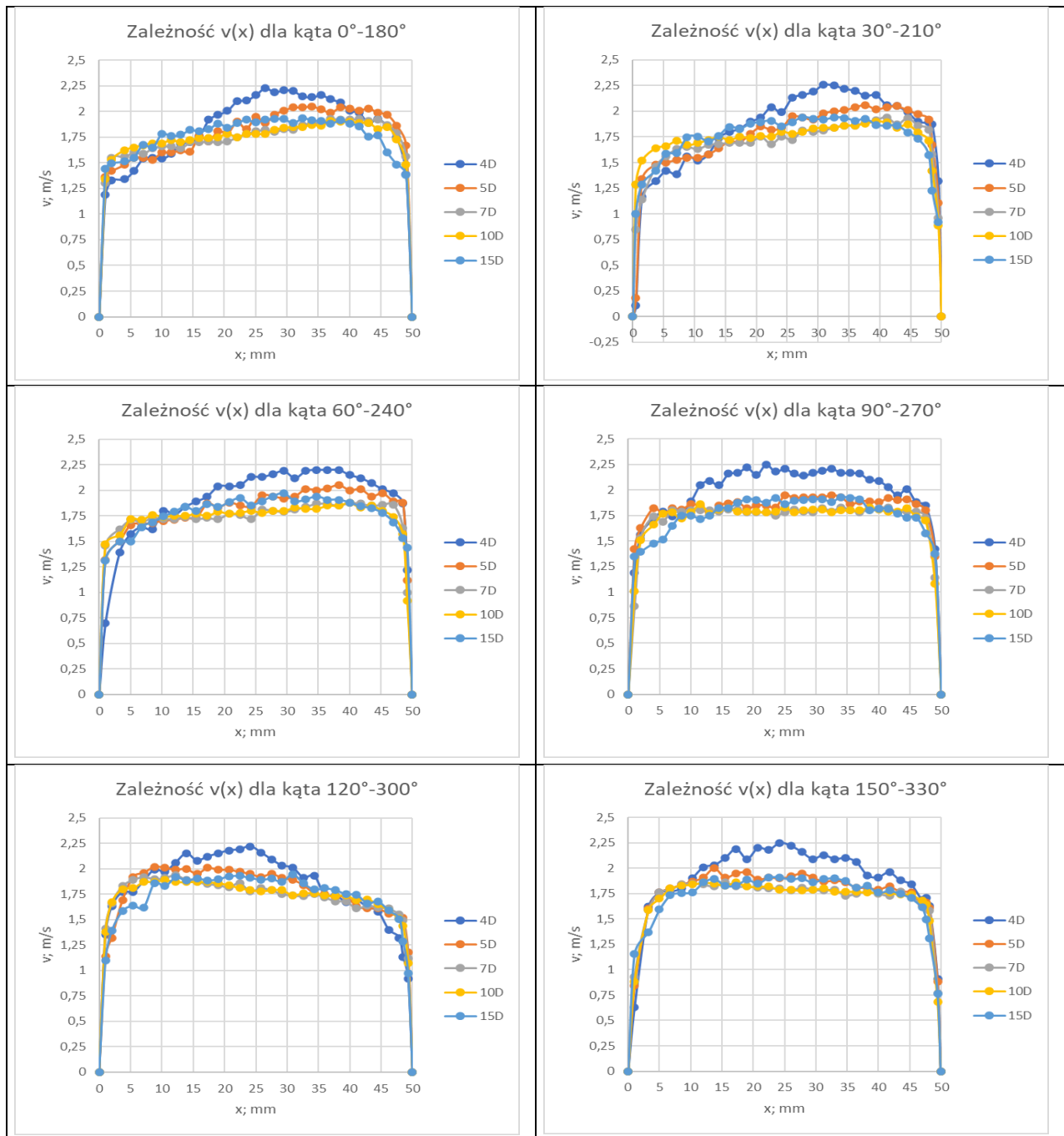


Zamieszczone w tabeli 7.11 wykresy wskazują na różnice w przebiegu zależności  $v(x)$  dla różnych kątów  $\alpha$ . Różnice są wynikiem zaburzeń rozkładu prędkości spowodowanego przez zasuwę nożową. Analiza powyższych wykresów prowadzi do analogicznych wniosków,

jak dla serii pomiarowej wykonanej przy  $Re=35\ 000$  i  $1/3$  wysokości zamknięcia zasuw. Dla wszystkich przedstawionych przekrojów pomiarowych 4D - 15D możemy wyróżnić grupę kątów ( $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ) dla których funkcja  $v(x)$  osiąga maksimum w zakresie  $x$  (5 mm , 15 mm), a w dalszym przebiegu wykazuje tendencję spadkową. Grupa kątów ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ) wykazuje się natomiast umiejscowieniem wartości maksymalnej w zakresie  $x$  (35 mm , 45 mm). W miarę zwiększania odległości przekroju pomiarowego od zasuw zauważalne jest zmniejszenie różnicy między wartościami maksymalnymi funkcji  $v(x)$ , a wartością średnią osiąganą w rejonie centrum profilu prędkości  $x = 25$  mm. Największe różnice występują dla przekroju 4D, natomiast najmniejsze dla przekroju 15D, dla którego przebieg zależności  $v(x)$  dla wszystkich kątów jest bardzo zbliżony.

## 7.8 LDA – rozkłady prędkości dla $Re \approx 70\ 000$ – 1/2 zamknięcia

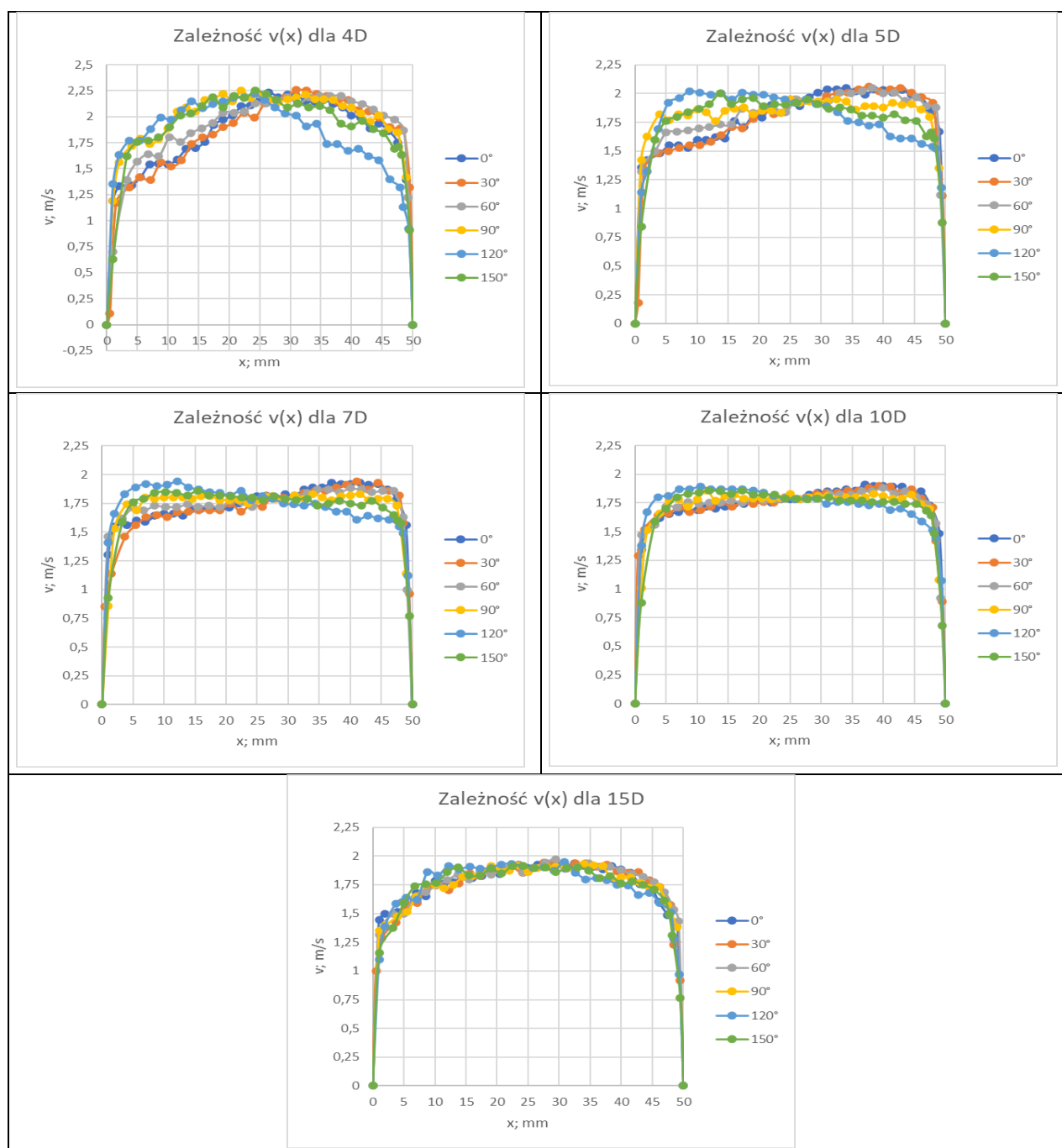
Tabela 7.12. Prezentacja rozkładów prędkości dla przekrojów w poszczególnych kątach  $\alpha$  w serii pomiarowej wykonanej przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw i przepływie liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$ .



Wykresy w tabeli 7.12 sporządzone dla pomiarów wykonanych przy  $Re \approx 70\ 000$  i 1/2 wysokości zamknięcia zasuw, wykazują analogiczne cechy charakterystyczne jak wykresy dla serii pomiarowej wykonanej przy  $Re \approx 35\ 000$  i 1/2 wysokości zamknięcia zasuw. Świadczy to o podobieństwie rozkładów prędkości, choć wartości prędkości są w przypadku omawianej serii dla  $Re \approx 70\ 000$  prawie 2-krotnie większe. W porównaniu z pomiarami wykonanymi dla  $Re \approx 70\ 000$  i 1/3 wysokości zamknięcia zasuw zauważalne są zdecydowanie większe fluktuacje wartości prędkości niż w przypadku wykresów sporządzonych dla pomiarów wykonanych przy 1/3 zamknięcia zasuw. Różnice pomiędzy seriami pomiarowymi dla

przekrojów 4D i 5D, a seriami 7D, 10D, 15D są wyraźniejsze. Jest to w pełni logiczne, ponieważ większy stopień zamknięcia zasowy powoduje większe zaburzenia struktury przepływu. Podobnie jak w przypadku 1/3 wysokości zamknięcia zasowy w przekrojach pomiarowych 7D, 10D, 15D możemy stwierdzić ustabilizowanie rozkładu prędkości, z miejscowo występującymi niewielkimi zaburzeniami. Dla kątów  $0^\circ$ - $180^\circ$ ,  $30^\circ$ - $210^\circ$ ,  $60^\circ$ - $240^\circ$  i  $120^\circ$ - $300^\circ$  wyraźna jest asymetria w przebiegu funkcji  $v(x)$  dla wszystkich przekrojów pomiarowych, przy czym stopień asymetrii rośnie wraz ze wzrostem odległości przekroju od zasowy będącej źródłem zaburzenia. Dla kątów  $90^\circ$ - $270^\circ$  i  $150^\circ$ - $330^\circ$  na zamieszczonych wykresach można zauważyć symetrię wokół centrum profilu  $x=25\text{mm}$ .

Tabela 7.13. Prezentacja rozkładów prędkości dla wybranych przekrojów pomiarowych z zakresu 4D-15D w serii pomiarowej wykonanej przy zamknięciu 1/2 wysokości zasowy i przepływieo liczbie Reynoldsa  $Re \approx 70\ 000$ .



Zamieszczone w tabeli 7.13 wykresy wskazują na różnice w przebiegu zależności  $v(x)$  dla różnych kątów  $\alpha$ . Różnice są wynikiem zaburzeń rozkładu prędkości spowodowanego przez zasuwę nożową i są one większe niż w serii pomiarowej dla 1/3 zamknięcia zasuw. W miarę zwiększania odległości przekroju pomiarowego od zasuw zauważalne jest zmniejszenie różnicy między wartościami maksymalnymi funkcji  $v(x)$ , a wartością średnią osiąganą w rejonie centrum profilu prędkości  $x = 25$  mm. Największe różnice występują dla przekroju 4D, natomiast najmniejsze dla przekroju 15D, dla którego przebieg zależności  $v(x)$  dla wszystkich kątów jest bardzo zbliżony.

## 8. Podsumowanie i wnioski końcowe

W niniejszej rozprawie doktorskiej zajmowano się tematyką wykonywania pomiarów przepływu z zastosowaniem techniki ultradźwiękowej. W pracy dokonano przeglądu metod pomiaru przepływu. Następnie szczegółowo omówiono metodę ultradźwiękową pomiaru, zaznaczając właściwości metrologiczne przepływomierzy tego rodzaju. Bardzo istotną zaletą przepływomierzy ultradźwiękowych jest bezkontaktowość i bezinwazyjność. Strumień przepływu w przepływomierzach ultradźwiękowych typu transit-time wyznaczany jest na podstawie zmierzonej różnicy czasów przejścia fali ultradźwiękowej pod prąd i z prądem przepływu. Podczas analizy skupiono się na przepływomierzach ultradźwiękowych typu clamp-on z głowicami nakładanymi na zewnętrzną powierzchnię rurociągu. Wśród nich wyróżniono różne rodzaje montażu głowic ultradźwiękowych. Dobór krotności przejścia fali ultradźwiękowej przez rurociąg pomiędzy czujnikami do warunków wykonywania pomiaru (ograniczeń geometrycznych) jest bardzo ważny z punktu widzenia analizy metrologicznej dokładności wykonanego pomiaru. W pracy zamieszczono wartości współczynnika kształtu rozkładu prędkości wyznaczone dla różnych układów montażu głowic przepływomierza na podstawie równania przetwarzania przepływomierza.

W części badawczej rozprawy zaprezentowano wyniki badań przeprowadzonych przy użyciu przepływomierza ultradźwiękowego. Pomiary wykonano na prostym odcinku rurociągu znajdującym się bezpośrednio za zasuwą nożową, którą na potrzeby serii pomiarowych ustawiano w pozycji zasłonięcia  $1/3$  i  $1/2$  wysokości zasuw. Badania eksperymentalne zostały zaplanowane do przeprowadzenia przy różnych wartościach strumienia objętości przepływu (różnych wartościach liczby Reynoldsa  $Re$ ), by potwierdzić uniwersalność zaburzeń wywoływanych przez przymknięcie zasuw. Pomiary wykonano w różnych odległościach przekroju pomiarowego od zasuw, co pozwoliło obserwować zmiany zaburzeń w rozkładach prędkości w szerokim spektrum odległości. W obrębie każdego przekroju pomiarowego pomiary wykonano w różnych ustawieniach kątowych głowic ultradźwiękowych w zakresie ( $0^\circ - 360^\circ$ ) z interwałem  $30^\circ$ . Dla dokładnego zbadania struktury przepływu wykonano dodatkowe badania anemometrii laserowej LDA. Zarówno dla rezultatów pochodzących z badań ultradźwiękowych, jak i anemometrycznych wyznaczono wartości współczynnika  $K^*$ . Współczynnik ten można wykorzystać do kompensacji błędu pomiarowego związanego z zaburzeniami rozkładu prędkości wywołanymi przez zasuwę nożową. Wykonane badania i sformułowane na podstawie otrzymanych wyników wnioski pozwoliły potwierdzić obie tezy pracy (rozdział 2.1).

## 8.1 Potwierdzenie tezy 2.1.1

Przedstawione wyniki badań i obliczeń udowadniają, że możliwa jest kompensacja błędu pomiaru wykonywanego za zaburzeniem, bez zachowania wymaganych odcinków prostych rurociągu za zaburzeniem, przez użycie wyznaczonego współczynnika kształtu rozkładu prędkości  $K^*$ . Współczynnik  $K^*$  można wyznaczyć jako zależność funkcyjną posługując się równaniem opisującym rozkład prędkości mierzonego w praktyce przepływu. Równanie takie można dobrać znając źródło zaburzenia przepływu. Niniejsza rozprawa miała na celu dopasowanie jednego z modeli rozkładów prędkości powszechnie używanych w literaturze (rozdział 4.4) do opisu przepływu zaburzonego przez obecność w instalacji hydraulicznej zasuwę nożowej, o różnym stopniu przymknięcia. W tym celu posłużono się 2 rodzajami kryteriów podobieństwa: graficznym i matematycznym. Pierwszym kryterium było podobieństwo wizualne rozkładów prędkości. W tym celu równania rozkładów prędkości oraz wyniki anemometrii laserowej LDA przedstawiono w formie graficznej w postaci rozkładów prędkości 2D i 3D. Drugim kryterium był wyznaczony dla równań rozkładów prędkości, dla wyników badań z użyciem przepływomierza ultradźwiękowego oraz dla wyników badań anemometrii LDA współczynnik  $K^*$ . Największy wpływ na dokładność implementacji modelu rozkładu prędkości do przepływu rzeczywistego w miejscu dokonywania pomiaru ma stopień zaburzenia przepływu (liczba Reynoldsa  $Re$ ) oraz odległość punktu pomiarowego od źródła zaburzenia.

Zidentyfikowano jeden model rozkładu prędkości najlepiej opisujący charakterystykę zaburzeń spowodowanych przez zasuwę nożową. Tym modelem jest model 6. Widoczne jest podobieństwo między kształtem profilu prędkości dla modelu 6, a kształtem profili prędkości przepływu rzeczywistego, wykonanymi na podstawie anemometrii. Ponieważ rozkład prędkości przepływu rzeczywistego zmienia się wraz ze zmianą odległości przekroju pomiarowego od zasuwę, istnieje konieczność każdorazowego doboru wartości współczynników liczbowych modelu ( $n$ ,  $k$ ,  $m$ ,  $a$ ), określających stopień zniekształcenia rozkładu prędkości. Pozwala to na wierne dopasowanie modelu rozkładu prędkości do przepływu rzeczywistego.

## 8.2 Potwierdzenie tezy 2.1.2

Analiza wyników pomiarów wykonanych przy użyciu przepływomierza ultradźwiękowego pozwoliła na identyfikację optymalnego punktu pomiarowego w odległości od zasuwę nożowej mniejszej niż określona w normach i zaleceniach. Przy określaniu miejsca pomiaru szukano minimalnej wartości błędu pomiaru, mniejszej niż błąd graniczny używanego przepływomierza. Sprawdzano, czy wartość obliczonego dla danych pomiarowych współczynnika  $K_{rz}^*$  - stanowiącego stosunek prędkości zmierzonej przy użyciu przepływomierza ultradźwiękowego przed zasuwę, w obszarze ustabilizowanego przepływu turbulentnego  $v_p$  do prędkości zmierzonej przy użyciu przepływomierza ultradźwiękowego za zasuwę, w obszarze zniekształconego przepływu turbulentnego  $v_z$  - mieści się w zakresie  $\langle 0,98; 1,02 \rangle$ . Przy ustalaniu szerokości przedziału uwzględniono wartość błędu granicznego wykorzystywanego podczas pomiarów przepływomierza  $\delta_{gr}=2\%$ . Znalezione optymalne miejsce pomiaru różniło się swoim położeniem w zależności od liczby Reynoldsa przepływu  $Re$ , od stopnia zamknięcia zasuwę nożowej oraz od sposobu rozmieszczenia głowic przepływomierza (układ Z lub układ V). Tabele pomiarowe i wykresy zależności  $K_{rz}^*(\alpha)$  sporządzone na podstawie danych pomiarowych, zamieszczone i omówione w rozdziale 6 pozwalają na identyfikację optymalnego punktu pomiarowego dla każdej serii pomiarowej, co przedstawiono w rozdziałach 8.2.1 i 8.2.2.

### 8.2.1 1/3 wysokości zamknięcia zasuw

Dla  $Re \approx 35\ 000$ , ustawienie typu Z, 1/3 zamknięcia zasuw – jedynie dla przekroju pomiarowego 15D wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w przedziale (0,98, 1,02) dla całego zakresu kątów  $\alpha$  ( $0^\circ$ - $360^\circ$ ). Optymalne kąty przeprowadzenia pomiaru to  $90^\circ$  i  $270^\circ$ , dla których w zakresie odległości 4D - 15D wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w przedziale (0,98, 1,02).

Dla  $Re \approx 35\ 000$ , ustawienie typu V, 1/3 zamknięcia zasuw – dla przekrojów pomiarowych 4D, 5D, 6D oraz 12D, 15D wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w przedziale (0,98, 1,02) dla całego zakresu kątów  $\alpha$  ( $0^\circ$ - $360^\circ$ ). Optymalne kąty przeprowadzenia pomiaru to  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $300^\circ$ ,  $330^\circ$  dla których w pełnym zakresie odległości 3D - 15D wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w przedziale (0,98, 1,02).

Dla  $Re \approx 70\ 000$ , ustawienie typu Z, 1/3 zamknięcia zasuw – dla przekrojów pomiarowych 12D oraz 15D wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w przedziale (0,98, 1,02) dla całego zakresu kątów  $\alpha$  ( $0^\circ$  -  $360^\circ$ ). Optymalny kąt przeprowadzenia pomiaru to  $270^\circ$ , dla którego w zakresie odległości 4D - 15D wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w przedziale (0,98, 1,02). Dla kątów  $120^\circ$  i  $150^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $210^\circ$ ,  $240^\circ$  dla których w zakresie odległości 6D-15D wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w przedziale (0,98, 1,02).

Dla  $Re \approx 70\ 000$ , ustawienie typu V, 1/3 zamknięcia zasuw – dla przekrojów pomiarowych 4D, 5D, oraz 15D wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w przedziale (0,98, 1,02) dla całego zakresu kątów  $\alpha$  ( $0^\circ$  -  $360^\circ$ ). Optymalne kąty przeprowadzenia pomiaru to  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  i  $300^\circ$ , dla których w pełnym zakresie odległości 3D - 15D wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w przedziale (0,98, 1,02).

### 8.2.2 1/2 wysokości zamknięcia zasuw

Dla  $Re \approx 35\ 000$ , ustawienie typu Z, 1/2 zamknięcia zasuw – dla wszystkich przekrojów wartości  $K_{rz}^*$  nie mieszczą się w przedziale (0,98, 1,02) dla całego zakresu kątów  $\alpha$  ( $0^\circ$ - $360^\circ$ ). Optymalne kąty przeprowadzenia pomiaru to  $270^\circ$  i  $300^\circ$ , dla których w zakresie odległości odpowiednio 9D - 15D i 8D - 15D wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w przedziale (0,98, 1,02).

Dla  $Re = 35\ 000$ , ustawienie typu V, 1/2 zamknięcia zasuw – jedynie dla przekroju pomiarowego 15D wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w przedziale (0,98, 1,02) dla całego zakresu kątów  $\alpha$  ( $0^\circ$ - $360^\circ$ ). Dla wszystkich kątów ustawienia głowic przepływomierza, poza kątami  $150^\circ$  i  $300^\circ$  wykazujących niewielkie odstępstwa, w zakresie odległości 10D-15D wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w przedziale (0,98, 1,02).

Dla  $Re = 70\ 000$ , ustawienie typu Z, 1/2 zamknięcia zasuw – dla przekroju pomiarowego 15D wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w przedziale (0,98, 1,02) dla całego zakresu kątów  $\alpha$  ( $0^\circ$ - $360^\circ$ ) z wyłączeniem kątów  $180^\circ$  i  $210^\circ$ . Optymalne kąty przeprowadzenia pomiaru to  $0^\circ$ ,  $300^\circ$  i  $330^\circ$ , dla których w zakresie odległości 9D - 15D wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w przedziale (0,98, 1,02).

Dla  $Re \approx 70\ 000$ , ustawienie typu V, 1/3 zamknięcia zasuw – dla przekrojów pomiarowych 12D oraz 15D wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w przedziale (0,98, 1,02) dla całego zakresu kątów  $\alpha$  ( $0^\circ$ - $360^\circ$ ). Optymalne kąty przeprowadzenia pomiaru to  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  i  $180^\circ$ , dla których w zakresie odległości 8D - 15D wartości  $K_{rz}^*$  mieszczą się w przedziale (0,98, 1,02).



### 8.3 Kluczowe wnioski i obserwacje

Na podstawie wyników pomiarów wykonanych przy użyciu przepływomierza ultradźwiękowego zaobserwowano, że przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw nożowej występowały znacznie większe zaburzenia przepływu niż w seriach pomiarowych realizowanych przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw. Wspomniane obserwacje zostały potwierdzone także badaniami anemometrii laserowej LDA. Analiza graficzna profili prędkości wykazała analogię w strukturze zaburzeń przepływów przy obu stopniach zamknięcia zasuw.

Porównując ze sobą przebieg zależności  $K_{rz}^*(\alpha)$  dla serii przy  $Re \approx 35\ 000$  i  $Re \approx 70\ 000$  widoczne są analogie. Można założyć, że zależność ta jest uniwersalna dla liczb Reynoldsa w zakresie przepływu turbulentnego. Jest to istotne, ponieważ pozwala na dobranie modelu rozkładu prędkości pozwalającego wyznaczyć współczynnik kształtu rozkładu prędkości i przy jego użyciu skompensowanie błędu pomiaru wykonywanego w warunkach niestandardowych, w odległości od przeszkody mniejsza niż wskazana w normach i zaleceniach.

Ustawienie głowic w układzie V skutkuje znacznie mniejszym rozrzutem wartości prędkości dla poszczególnych kątów niż ustawienie typu Z. Spowodowane jest to podwójnym przejściem fali ultradźwiękowej pomiędzy czujnikami w ustawieniu typu V, co pozwala uśrednić prędkość w większej przestrzeni przepływu pomiędzy czujnikami niż ustawienie typu Z;

Ustawienie głowic typu V wykazuje znacznie mniejszą zmienność w zależności od odległości przekroju pomiarowego od zasuw, będącej źródłem zaburzeń przepływu. Dlatego wartości zmierzone w układzie typu V wykazują znacznie mniejsze wahania w strefie znajdującej się najbliżej zasuw niż wartości zmierzone w układzie typu Z;

Wraz ze wzrostem odległości przekroju pomiarowego od zasuw wartości współczynnika  $K_{rz}^*(\alpha)$  zbiegają do siebie tj. wartości zmierzone w układzie głowic typu Z stabilizują się na określonym poziomie, wykazują coraz mniejszą zależność od kąta ustawienia głowic  $\alpha$  i zbliżają się do wartości współczynnika  $K_{rz}^*$  wyznaczonych dla pomiarów wykonanych w układzie typu V.

## 8.4 Zalecenia pomiarowe

Na podstawie analizy rezultatów badań sformułowano zalecenia dotyczące pomiarów przepływu przepływomierzem ultradźwiękowym z głowicami nakładanymi typu clamp-on w odległościach od przeszkody mniejszych niż zalecane w normach i zaleceniach. Przy tworzeniu poniższych zaleceń posługiwano się wynikami pomiarów za przeszkodą w postaci nożowej, lecz sformułowane zasady mają charakter uniwersalny i odnoszą się także do przepływów zaburzanych przez inne rodzaje przeszkód, takich jak przykładowo kolana hydrauliczne, zawory i przepustnice, konfuzory/dyfuzory.

1. W celu wykonania pomiaru należy wybrać, w miarę możliwości adaptacyjnych, miejsce na rurociągu znajdujące się najdalej od przeszkody. Wpływ przeszkody na rozkład prędkości przepływu słabnie wraz ze wzrostem odległości od niej.
2. Należy zapewnić, w miarę możliwości adaptacyjnych, wielokrotne przejście fali ultradźwiękowej pomiędzy głowicami przepływomierza. Układ głowic typu Z powoduje większy błąd pomiaru będący wynikiem zaburzeń przepływu w przestrzeni pomiarowej pomiędzy czujnikami niż układy wielokrotnego przejścia fali ultradźwiękowej V i W.
3. W obszarze przepływu o zniekształconym rozkładzie prędkości zalecane jest, w miarę możliwości adaptacyjnych, wykonanie pomiarów na całym obwodzie rurociągu z odpowiednio niewielkim stałym interwałem kąta ustawienia głowic  $\alpha$  (np.  $30^\circ$ ) i następnie wyznaczenie wartości średniej prędkości.
4. Do kompensacji błędu pomiarowego będącego następstwem zniekształconego rozkładu prędkości przepływu można zastosować współczynnik kształtu rozkładu prędkości  $K^*$ . Współczynnik ten powinien zostać wyznaczony przy wykorzystaniu równania rozkładu prędkości, opisującego zniekształcenia rozkładu prędkości analogiczne do zaburzenia wywołanego przez przeszkodę. Do wyznaczenia wartości współczynnika  $K^*$  może posłużyć symulacja CFD przepływu lub dokładne badania struktury przepływu np. anemometria laserowa LDA.
5. Zaleca się wykonanie pomiarów i uśrednienie wyników na całym obwodzie rurociągu i późniejszą kompensację błędu pomiarowego za pomocą współczynnika  $K^*$  uśrednionego dla pełnego zakresu kątów  $\alpha$  ( $0^\circ - 360^\circ$ ). W przypadku braku możliwości takiego wykonania procesu pomiarowego należy skompensować błąd pomiaru punktowego za pomocą współczynnika  $K^*$  wyznaczonego dla konkretnego kąta  $\alpha$ .

## 9. Bibliografia

- [1] T. Dawid, Pomiar ciśnienia, prędkości i strumienia przepływu, Kraków: AGH Uczelnialne Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, 2006.
- [2] M. Turkowski, Metrologia przepływów, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2018.
- [3] J. Pospolita, Pomiary strumieni płynów, Opole: Oficyna Wydawnicza PO, 2004.
- [4] J. Piotrowski, Pomiary: czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego, Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2009.
- [5] E. Pistun i J. Stańda, Pomiary ilości oraz strumienia masy i objętości przepływających płynów., Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2006.
- [6] Z. Kabza, Pomiary strumieni płynów (przewodnik), Studia i Monografie z. 90 red., Opole: Komitet Redakcyjny Wydawnictw Politechniki, 1996.
- [7] F. Kotlewski i M. Mieszkowski, Redaktorzy, Pomiary w technice cieplnej, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1972.
- [8] M. Mieszkowski, Pomiary cieplne i energetyczne, Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1985.
- [9] J. Hendiger, Wentylacja i klimatyzacja: laboratorium, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2019.
- [10] F. Strzelczyk, Metody i przyrządy w pomiarach cieplno-przepływowych, Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 1993.
- [11] J. Marecki, Gospodarka skojarzona cieplno-elektryczna, Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1991.
- [12] J. Szargut, Termodynamika, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2013.
- [13] D. Turzaniecka, Ocena niepewności wyniku pomiarów, Poznań: Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1997.
- [14] J. Arendarski, Niepewność Pomiarów, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2013.
- [15] M. Cichoń, „Bezinwazyjne pomiary przepływu, czyli rozprawa z mitami – cz. I,” *Pod Kontrolą, Automatyka i Pomiary*, nr 4/2014, pp. 11-13, 2014.
- [16] M. Cichoń, „Bezinwazyjne pomiary przepływu, czyli rozprawa z mitami – cz. II,” *Pod Kontrolą, Automatyka i Pomiary*, nr 1/2015, pp. 11-13, 2015.
- [17] S. Waluś, Przepływomierze ultradźwiękowe: Metodyka stosowania, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1997.
- [18] J. Hruban, F. Strzelczyk i S. Waluś, *Pomiar strumienia objętości płynu w przewodach. Przepływomierze ultradźwiękowe*, 1998.
- [19] S. Waluś, Optymalizacja metrologiczna pomiaru strumienia płynu za pomocą przepływomierzy próbkujących, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2003.
- [20] Y. Murai, N. Furuichi, Y. Takeda i Y. Tasaka, „Measurement of Fluid Flow,” w *Ultrasonic Doppler Velocity Profiler for Fluid Flow*, Y. Takeda, Red., Tokyo, Springer Japan, 2012.
- [21] C. G. Speziale, „Turbulence Modeling for Time-Dependent RANS and VLES: A Review,” *AIAA Journal*, tom vol. 36, nr No. 2, 2 February 1998.
- [22] G. F. Homicz, „Computational Fluid Dynamic Simulations of Pipe Elbow Flow,” Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 2004.
- [23] H. K. Versteeg i W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics - THE FINITE VOLUME METHOD, Second Edition red., Edinburgh Gate: Pearson Education Limited, 2007.
- [24] I. Sadreghighi, „Turbulence Modeling - A Review,” 2018.
- [25] J. Bardina, P. G. Huang i T. J. Coakley, „Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development,” NASA, California, 1997.

- [26] K. Ekambara, R. S. Sanders, K. Nandakumar i J. H. Masliyah, „Hydrodynamic Simulation of Horizontal Slurry Pipeline Flow Using ANSYS-CFX,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, pp. 8159-8171, 2009.
- [27] W. Rodi i G. Scheuerer, „Calculation of curved shear layers with twoequation turbulence models,” *Physics of Fluids*, tom Vol. 26, nr No. 6, pp. 1422-1436, June 1983.
- [28] S. Zhang, B. Su, J. Liu, X. Liu, G. Qi i Y. Ge, „Analysis of flow characteristics and flow measurement accuracy of elbow with different diameters,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018.
- [29] P. Piechota, P. Synowiec, A. Andruszkiewicz i W. Wędrychowicz, „Selection of the Relevant Turbulence Model in a CFD Simulation of a Flow Disturbed by Hydraulic Elbow - Comparative Analysis of the Simulation with Measurements Results Obtained by the Ultrasonic Flowmeter,” *Journal of Thermal Science*, tom 27, nr 5, pp. 413-420, Październik 2018.
- [30] P. Synowiec, A. Andruszkiewicz, W. Wędrychowicz, P. Piechota i E. Wróblewska, „Influence of flow disturbances behind the 90° bend on the indications of the ultrasonic flow meter with clamp-on sensors on pipelines,” *Sensors Volume 2021*, pp. 1-23, 03 2021.
- [31] P. Synowiec, W. Wędrychowicz i A. Andruszkiewicz, „Pomiary strumieni przepływów dwufazowych metodami ultradźwiękowymi za kolanem rurociągu,” *Elektronika: technologie, konstrukcje, zastosowania*, nr 09/2016, pp. 115-117, 2016.
- [32] P. Piechota, P. Synowiec, A. Andruszkiewicz, W. Wędrychowicz i K. Tajchman, „Analiza metrologiczna zastosowania przepływomierza ultradźwiękowego w niestandardowych warunkach wykonywania pomiarów za przepustnicą,” *Elektronika*, nr nr 10, pp. 44-47, 2018.
- [33] K. Kumar, S. Komble, S. Thorat, P. Korgaonkar, V. Bartakke, P. Sonje, O. Chavan i K. Kavire, „Validation of installation effects of an ultrasonic flow meter on butterfly valve using numerical analysis,” *Materials Today Proceedings Volume 46 Part 15*, pp. 6692-6699, 2021.
- [34] A. S. Awad, Z. Abulghanam, S. M. Fayyad, S. AlSaqoor, A. Alahmer, N. Aljabarin, P. Piechota, A. Andruszkiewicz, W. Wędrychowicz i P. Synowiec, „Measuring the fluid flow velocity and its uncertainty using Monte Carlo method and ultrasonic technique,” *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics Vol. 15*, pp. 172-182, 2020.
- [35] A. Andruszkiewicz, W. Wędrychowicz, P. Synowiec i P. Piechota, „Analiza możliwości zastosowania przesłony w rurociągu jako zwężki do ciągłego pomiaru strumieni masy gazu,” *Przegląd Elektrotechniczny*, pp. 41-43, 11 2019.
- [36] P. Synowiec, A. Andruszkiewicz, W. Wędrychowicz i P. Regucki, „Badania możliwości pomiaru strumienia objętości czynnika dwufazowego przepływomierzem ultradźwiękowym,” *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10/2015, pp. 179-182, 2015.
- [37] P. Synowiec, P. Piechota, W. Wędrychowicz i A. Andruszkiewicz, „Stanowisko do badań przepływu za elementami armatury hydraulicznej, zaburzającymi przepływ,” *Elektronika*, nr nr 10, pp. 53-55, 2018.
- [38] P. Synowiec, W. Wędrychowicz, P. Piechota i A. Andruszkiewicz, „Dopplerowska anemometria laserowa jako metoda pomiaru przepływu za łukiem 90°,” *Przegląd Elektrotechniczny*, pp. 90-92, 11 2019.
- [39] W. Wędrychowicz, P. Synowiec i A. Andruszkiewicz, „Analiza możliwości pomiaru strumienia objętości przepływomierzem ultradźwiękowym bez zachowania odcinków wstępnych,” *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, nr 55, 2017.
- [40] W. Wędrychowicz, P. Synowiec, P. Piechota i A. Andruszkiewicz, „Modele rozkładu prędkości gazu w przepływie przez przewód o przekroju kołowym,” *Przegląd Elektrotechniczny*, pp. 72-75, 11 2019.
- [41] A. Albiński, S. Waluś i J. Żelezik, „Estimation of one-path ultrasonic flowmeter characteristic for the case of distorted velocity distribution,” *2nd BRAZILIAN SYMPOSIUM ON FLOW MEASUREMENT*, pp. 127-134, 20-24 03 1995.
- [42] J. Szebeszczyk, S. Pietraszek i S. Waluś, „Model użytkowy przepływomierza ultradźwiękowego do bezzakłuceniowego pomiaru przepływu cieczy jednorodnych w rurociągach,” *Metrologia i Systemy Pomiarowe*, pp. 85-102, 1989.
- [43] S. Waluś, „The possibility of the analytical setting of ultrasonic flow-meter characteristic in the standard conditions of settlement,” *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 969*, nr 93, pp. 273-282, 1988.
- [44] S. Waluś, „Błędy metody przepływomierza ultradźwiękowego,” *Metrologia*, pp. 393-400, 1983.
- [45] S. Waluś, „Dobór podstawowych parametrów konstrukcyjnych czujnika przepływomierza ultradźwiękowego z głowicami nakładanymi na rurociąg,” *Symposium Metrologia '89 Warszawa*, pp. 436-443, 21-23 06 1989.

- [46] S. Waluś, „Przepływomierze ultradźwiękowe - właściwości metrologiczne,” *PAK*, pp. 8-9, 1 1978.
- [47] S. Waluś, „SOME GUIDELINES FOR ULTRASONIC FLOWMETER SENSORS INSTALLATION FOR DISTORTED VELOCITY PROFILES,” *Molecular and Quantum Acoustics Volume 19*, pp. 91-102, 1998.
- [48] S. Waluś, „THE USE OF THE ULTRASONIC FLOWMETER IN THE CONDITIONS OTHER THAN NORMAL,” *International Conference on Flow Measurement Melbourne 1985*, pp. 171-176, 20-23 08 1985.
- [49] S. Waluś, „The compensation of sensitivity changes and the influence of liquid temperature in the microprocessor-based multi-path ultrasonic flowmeter,” *Wissenschaftliche Tage 1989 Magdeburg*, pp. 214-218, 5-6 09 1989.
- [50] S. Waluś, „Ultradźwiękowy przepływomierz - wodomierz UMP-10,” *PAK*, pp. 181-183, 06 1983.
- [51] S. Waluś, „Ultraschalldurchflussmessung bei gestortem Stromungsprofil,” *36 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Ilmenau 1991*, pp. 427-432, 21-24 10 1991.
- [52] S. Waluś, „Wpływ montażu na błąd przepływomierza ultradźwiękowego,” w *XV Międzyuczelniana Konferencja Metrologów Warszawa 23-25 IX 1981*, Warszawa, 1981.
- [53] S. Waluś, „Wybrane problemy związane ze stosowaniem ultradźwięków w przepływomierzach ultradźwiękowych z nakładanymi głowicami,” *Molecular and Quantum Acoustics (Volume 17)*, 02 1996.
- [54] S. Waluś, „Zmniejszenie błędu metody związanego ze zniekształconym rozkładem prędkości w dwudrogowym przepływomierzu ultradźwiękowym,” *PAK*, pp. 34-38, 12 1999.
- [55] S. Waluś i J. Żelazik, „VOLUME FLOW-RATE MEASUREMENT WITH HELP OF SAMPLING FLOWMETER WITH SURFACE SENSOR,” *Molecular and Quantum Acoustics (Volume 20)*, pp. 291-300, 1999.
- [56] S. Waluś, „Mathematical modelling of an ultrasonic flowmeter primary device,” *Archives of Acoustics (23)*, pp. 429-442, 01 1998.
- [57] K. Jeżowiecka-Kabsch i H. Szewczyk, *Mechanika płynów*, Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2001.
- [58] J. Sobota, *Hydraulika i mechanika płynów*, wydanie drugie, zmienione red., Wrocław: Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 2003.
- [59] L. D. Landau i E. M. Lifszyc, *Fizyka teoretyczna - Hydrodynamika*, wydanie trzecie red., J. E. Roguski, Red., Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1994.
- [60] W. Prosnak, *Mechanika Płynów*, tom I, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1970.
- [61] R. Puzyrewski i J. Sawicki, *Podstawy mechaniki płynów i hydrauliki*, wydanie drugie, zmienione red., Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1998.
- [62] R. Gryboś, *Podstawy mechaniki płynów część 2*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN S.A., 1998.
- [63] A. Śliwiński, *Ultradźwięki i ich zastosowania*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowo Techniczne, 2001.
- [64] E. Talarczyk, *Podstawy techniki ultradźwięków*, wydanie drugie zmienione red., Wrocław: Politechnika Wrocławska, 1990.
- [65] H. Kuttruff, *Ultrasonics Fundamentals and Applications*, London New York: Elsevier Applied Science, 1991.
- [66] A. F. Everest, *Master Handbook of Acoustic*, wydanie 1 red., Katowice: Sonia Draga Sp. z o. o., 2004.
- [67] L. Hu, Z. Fang, L. Qin, K. Mao, W. Chen i X. Fu, „Modelling of received ultrasonic signals based on variable frequency,” *Flow Measurement and Instrumentation*, pp. 141-149, 03 2019.
- [68] Y. Takeda i Y. Tasaka, „Ultrasonic Wave for Fluid Flow,” w *Ultrasonic Doppler Velocity Profiler for Fluid Flow*, Y. Takeda, Red., Tokyo, Springer Japan, 2012.
- [69] KROHNE Messtechnik GmbH & Co. KG, „Fundamentals of Ultrasonic flow measurement for industrial applications,” Duisbur, 2000.
- [70] Siemens AG, „Siemens - Ultrasonic flow measurement,” Siemens, 2019. [Online]. Available: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/process-instrumentation/flow-measurement/ultrasonic.html>. [Data uzyskania dostępu: 09 kwiecień 2019].

- [71] R. C. Baker, *Flow Measurement Handbook*, Industrial design, operating principles, performance and applications, 1st Edition red., Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [72] S. Zator, *Laserowe przepływomierze dopplerowskie - badania własne*, Opole: Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2007.
- [73] H. Lechner, „Ultrasonic flow metering based on transit time differentials which are insensitive to flow profile,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, tom Volume 74, nr Number 955, 1983.
- [74] D. V. Mahadeva, R. C. Backer i J. Woodhouse, „Further Studies of the Accuracy of Clamp-on Transit-Time Ultrasonic Flowmeters for Liquids,” *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, nr Volume: 58, Issue: 5, May 2009, pp. 1602 - 1609, 2009.
- [75] R. S. Martins, J. R. Andrade i R. Ramos, „On the effect of the mounting angle on single-path transit-time ultrasonic flow measurement of flare gas,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020.
- [76] P. I. Moore, G. J. Brown i B. P. Stimpson, „Ultrasonic transit-time flowmeters modelled with theoretical velocity profiles: methodology,” *MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY*, pp. 1802-1810, 2000.
- [77] H. Zhang, C. Guo i J. Lin, „Effects of Velocity Profiles on Measuring Accuracy of Transit-Time Ultrasonic Flowmeter,” *Applied Sciences*, 20 04 2019.
- [78] C. Sejong, Y. Byung-Ro, K. Woong i K. Hyu-Sang, „Assessment of combined V/Z clamp-on ultrasonic flow metering,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, tom vol. 28, nr no. 6, pp. 2169-2177, 2014.
- [79] S. Wöckel, U. Steinmann i J. Auge, „Signalanalyse für Ultraschall-Clamp-on-Systeme (Signal processing for ultrasonic clamp-on-sensor-systems),” *tm – Technisches Messen*, tom Volume 81, nr Issue 2, p. 86–92, 2014.
- [80] Endress+HauserAG, „Technical Information Proline Prosonic Flow 93T Portable,” 01 07 2011. [Online]. Available: [https://portal.endress.com/wa001/dla/5000254/3000/000/02/TI00085DEN\\_1311.pdf](https://portal.endress.com/wa001/dla/5000254/3000/000/02/TI00085DEN_1311.pdf). [Data uzyskania dostępu: 21 05 2019].
- [81] Micronics Ltd, User Manual of Portable Ultrasonic Flow Meter „Micronics Portaflow PF330, Loudwater: Micronics Ltd, 2012.
- [82] Endress+Hauser, „Instrukcja obsługi Proline Prosonic Flow 93T HART - Przenośny przepływomierz ultradźwiękowy,” 2011.
- [83] H. Zhou, T. Ji, R. Wang, X. Ge, X. Tang i S. Tang, „Multipath ultrasonic gas flow-meter based on multiple reference waves,” *Ultrasonics*, pp. 145-152, 15 08 2017.
- [84] H. Zhao, L. Peng, T. Takahashi, T. Hayashi, K. Shimizu i T. Yamamoto, „Support Vector Regression-Based Data Integration Method for Multipath Ultrasonic Flowmeter,” *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, pp. 2717-2725, 12 2014.
- [85] L. Peng, B. Zhang, H. Zhao, S. A. Stephane, H. Ishikawa i K. Shimizu, „Data Integration Method for Multipath Ultrasonic Flowmeter,” *IEEE SENSORS JOURNAL*, pp. 2866-2874, 09 2012.
- [86] T. Petrut, C. Ioana, A. Digulescu, I. Candel i G. Vasile, „Flow Rate Computation of Highly Turbulent Pipe Flows using Wide-Band Signals and Matched Filter-Based Approach in Ultrasonic Multi-Element Configuration,” *IGHEM*, 09 2014.
- [87] Y. Pistun, V. Roman i F. Matiko, „Investigating the Ultrasonic Flowmeter Error in Conditions of Distorted Flow Using Multi-peaks Salami Functions,” *ERRORS AND UNCERTAINTY*, pp. 14-19, 24 10 2019.
- [88] E. Thompson, „FUNDAMENTALS OF MULTIPATH ULTRASONIC FLOW METERS FOR GAS MEASUREMENT,” *American School of Gas Measurement Technology Publications*, 2010.
- [89] Q. Chen, W. Li i J. Wu, „Realization of a multipath ultrasonic gas flowmeter based on,” *Ultrasonics*, pp. 285-290, 18 12 2012.
- [90] N. Sakhavi i N. M. Nouri, „Generalized velocity profile evaluation of multipath ultrasonic phased array flowmeter,” *Measurement*, 6 12 2021.
- [91] P. K. Normalizacyjny, *PN-M-42370*, 1998.
- [92] PKN, Red., *Norma PN-EN ISO 5167-1:2000*, -: Polski Komitet Normalizacyjny, 2000.
- [93] P. K. Normalizacyjny, *Norma PN-ISO 17089*, 2013.
- [94] D. I. Crecraft, „Ultrasonic instrumentation: principles, methods and applications,” *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, tom Volume 16, nr Number 3, 1983.

- [95] D. Stoker, S. Barfuss i M. C. Johnson, „Ultrasonic Flow Measurement for Pipe Installations with Non-Ideal Conditions,” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, tom Volume 138, nr Number 11, pp. pp. 993-998, 2012.
- [96] H. Utsumi, „An Ultrasonic velocitometer for use of calibration of waste-water flowmeter,” w *Fluid control and measurement*, tom Volume 2, M. Harada, Red., Tokyo, Pergamon Press, 1985, pp. 997-1002.
- [97] J. Hogendoorn, H. Hofstede, P. v. Brakel i A. Boer, „How Accurate are Ultrasonic Flowmeters in Practical Conditions;” *NSFMW*, 2011.
- [98] K. Tawackolian, O. Büker, J. Hogendoorn i T. Lederer, „Calibration of an ultrasonic flow meter for hot water,” *Flow Measurement and Instrumentation*, pp. 166-173, 04 2013.
- [99] L. Ma, J. Liua i J. Wang, „Study of the accuracy of ultrasonic flowmeters for liquid,” *AASRI Procedia*, pp. 14-20, 2012.
- [100] P. Lunde i K.-E. Frøysa, HANDBOOK OF UNCERTAINTY CALCULATIONS; Ultrasonic fiscal gas metering stations, The Norwegian Petroleum Directorate (NPD), 2001.
- [101] C. Knapp, „Geschwindigkeits- und Mengemessung strömender Flüssigkeiten mit Ultraschall,” *VDI Berichte, Durchflußmessung - Offene Probleme, Neuere Methoden*, nr 86, pp. 65-71, 1964.
- [102] K. Sudo, M. Sumida i H. Hibara, „Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 90-degree bend,” *Experiments in Fluids*, tom Vol. 25, nr No. 1, pp. 42-49, 1998.
- [103] K. Amri, Suprijanto, E.Juliastuti i D. Kurniadi, „Asymmetric Flow Velocity Profile Measurement using Multipath Ultrasonic Meter with Neural Network Technique,” *5th International Conference on Instrumentation, Control and Automation*, pp. 146-151, 9-11 08 2017.
- [104] S. Frank, C. Heilmann i H. E. Siekmann, „Point-velocity methods for flow-rate measurements in asymmetric pipe flow,” *Flow Measurement and Instrumentation*, tom Vol. 7, nr No. 3/4, p. 201–209, 1997.
- [105] J. E. A. John i W. L. Haberman, Introduction to fluid mechanics, 3rd Edition red., Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1988.
- [106] J. W. Elsner, Turbulencja Przepływów, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1972.
- [107] W. Merzkirch, Fluid Mechanics of Flow Metering, W. Merzkirch, Red., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [108] L. A. Salami, „Errors in the velocity area method of measuring asymmetric flows in circular pipes,” *Modern developments in Flow measurement*, pp. 381-399, 21 September 1971.
- [109] M. Nallasamy, „Turbulence models and their applications to the prediction of internal flows: A review,” *Computers & Fluids*, tom Vol. 15, nr No. 2, pp. 151-194, 1987.
- [110] Endress+Hauser, *Flow Handbook. A Practical Guide: Measurement Technologies – Applications – Solutions*, Endress+Hauser Flowtec AG, 2004.
- [111] T. A.T, Hydromechanika, Warszawa: WNT, 1967.
- [112] M. R.W, Flow measurement engineering handbook, New York: McGraw-Hill, Inc, 1989.
- [113] Endress+Hauser AG, „Karta katalogowa przepływomierza elektromagnetycznego Promag 53W,” 01 02 2004. [Online]. Available: <https://portal.endress.com/wa001/dla/5000000/5526/000/01/TI046dpl.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 21 05 2019].
- [114] Endress+Hauser AG, „Instrukcja obsługi przepływomierza elektromagnetycznego Promag 53W,” 01 03 2005. [Online]. Available: <https://portal.endress.com/wa001/dla/5000020/6454/000/00/Ba047dpl.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 21 05 2019].
- [115] Endress+Hauser AG, „Certyfikat kalibracji przepływomierza elektromagnetycznego Promag 53W,” 2007.
- [116] Emerson Process Management Sp. z o.o., „Karta katalogowa - Przetwornik ciśnienia Rosemount 1151,” 2004.
- [117] LUMEL S.A., „Karta katalogowa - Rejestrator ekranowy KD7,” [Online]. Available: [https://www.lumel.com.pl/resources/Pliki%20do%20pobrania/KD7/KD7\\_karta\\_katalogowa\\_rev\\_M.pdf](https://www.lumel.com.pl/resources/Pliki%20do%20pobrania/KD7/KD7_karta_katalogowa_rev_M.pdf). [Data uzyskania dostępu: 19 05 2019].
- [118] LUMEL S.A., „Instrukcja Obsługi - Rejestrator Ekranowy KD7,” [Online]. Available: [https://www.lumel.com.pl/resources/Pliki%20do%20pobrania/KD7/KD7\\_instrukcja\\_obsługi\\_rev\\_M.pdf](https://www.lumel.com.pl/resources/Pliki%20do%20pobrania/KD7/KD7_instrukcja_obsługi_rev_M.pdf). [Data uzyskania dostępu: 19 05 2019].
- [119] G. U. Miar, Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik, Warszawa: Główny Urząd Miar, 1999.

- [120] A. Zięba, Analiza danych w naukach ścisłych i technice, Wyd. I red., Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2013.
- [121] J. Bek, A. Fiok i J. Jaworski, Redaktorzy, Mała encyklopedia metrologii, Warszawa: Wydawnictwo Naukowo - Techniczne, 1989.
- [122] J. Ciepłucha, Podstawy Metrologii, wydanie 2. Rozszerzone i zmienione red., Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2008.
- [123] J. R. Taylor, Wstęp do analizy błędu pomiarowego, Wyd. II zmienione red., A. Bogdanienco, Red., Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1999.
- [124] M. Lisowski, Podstawy metrologii, Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011.
- [125] A. Weissenbrunner, A. Fiebach, S. Schmelter, M. Bar, P. Thamsen i T. Lederer, „Simulation-based determination of systematic errors of flow meters due to uncertain inflow conditions,” *Flow Measurement and Instrumentation*, pp. 25-39, 2016.
- [126] K. Kumar, K. Farande i G. Sahoo, „Installation effects of a clamp-On transit time ultrasonic flow meter,” *International Journal of Fluid Mechanics 2011*, p. 489–498, 2011.
- [127] S. Wada i N. Furuichi, „Influence of obstacle plates on flowrate measurement uncertainty based on ultrasonic Doppler velocity profile method,” *Flow Measurement and Instrumentation*, pp. 81-89, 04 2016.
- [128] JCGM, Red., JCGM 101:2008 Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method, JCGM - Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.
- [129] JCGM, Red., JCGM 106:2012 Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment, JCGM - Joint Committee for Guides in Metrology, 2012.
- [130] JCGM/WG 1, Red., JCGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections; Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM- Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.
- [131] JCGM/WG 1, Red., JCGM 102:2011 Evaluation of measurement data - Supplement 2 to the uncertainty in measurement” – Extension to any number of output quantities, JCGM - Joint Committee for Guides in Metrology, 2011.
- [132] JCGM/WG 1, Red., JCGM 104:2009 Evaluation of measurement data - An introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents, JCGM - Joint Committee for Guides in Metrology, 2009.
- [133] JCGM/WG 2, Red., JCGM 200:2008 International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM), JCGM - Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.
- [134] P. Fotowicz, „Obliczanie niepewności pomiaru zgodne z definicją przedziału rozszerzenia na przykładzie opracowania wyniku wzorcowania mikrometru,” *Pomiary Automatyka Robotyka*, pp. 48-52, 2010.
- [135] L. Dzwonkowski A. Golijanek-Jędrzejczyk A. Rafiński, „Szacowanie niepewności pomiaru temperatury skóry metodą Monte Carlo,” *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej 34*, pp. 21-24, 2013.
- [136] C. Pfeifer, C. Bruzzese, G. Fast, D. Kuhn i A. G. Class, „Application of the Tomographic Laser Doppler Anemometry (TDLA) to a,” *Flow Measurement and Instrumentation*, pp. 456-460, 08 07 2011.
- [137] F. M. a. Instrumentation, „Application of the Tomographic Laser Doppler Anemometry (TDLA) to a fuel spray,” *Flow Measurement and Instrumentation*, pp. 456-460, 10 2011.
- [138] J. B. Abbiss, T. W. Chubb i E. R. Pike, „Laser Doppler anemometry,” *Optics & Laser Technology*, tom Vol. 6, nr Issue 6, pp. 249-261, December 1974.
- [139] S. Bopp, F. Durst, J. Holweg i H. Weber, „A laser—Doppler sensor for flowrate measurements,” *Flow Measurement and Instrumentation*, tom Vol.1, nr No. 1, 1989.
- [140] Dantec Measurement Technology A/S, FlowLite Installation & User's guide, Skovlunde: -, 1995.
- [141] Dantec Measurement Technology A/S, BSA/FVA Flow Software Installation & User's guide vol.1, Skovlunde: -, 2000.
- [142] Dantec Measurement Technology A/S, BSA/FVA Flow Software Installation & User's guide vol.2, Skovlunde: -, 2000.