



**POLITECHNIKA ŚLĄSKA**  
**Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki**  
*Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych*

**Wspólna Szkoła Doktorska**

# **PRACA DOKTORSKA**

**mgr inż. Adrian Czajkowski**

**„Konstrukcja, badania i optymalizacja systemu pomiaru strumienia pracującego  
w warunkach długookresowego użytkowania w środowisku wody twardej”**

Promotor: **dr hab. inż. Leszek Remiorz, prof. PŚ**

Promotor pomocniczy: **dr inż. Sebastian Pawlak**

*Dziedzina nauki:*

**nauki inżynieryjno-techniczne**

*Dyscyplina naukowa:*

**Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka**

Gliwice 2024

*Składam serdeczne podziękowania  
mojemu Promotorowi  
dr. hab. inż. Leszkowi Remiorzowi, prof. PŚ  
za wyjątkową cierpliwość, motywację i przekazaną wiedzę  
oraz  
mojemu Promotorowi Pomocniczemu  
dr. inż. Sebastianowi Pawlakowi  
za pomoc, wiele cennych spostrzeżeń i nadzór nad pracą*

*Serdecznie dziękuję bliskiej mi Osobie  
za wiarę, wsparcie oraz motywację w chwilach zwątpienia*

*Dziękuję Koleżankom i Kolegom  
za rady, wskazówki oraz cenną wiedzę*

*Dziękuję Rodzinie i Przyjaciółom  
za obecność i wsparcie*

*Praca ta powstała w ramach Doktoratu Wdrożeniowego, finansowanego przez  
Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w Polsce.*

## **Spis treści**

Wykaz ważniejszych symboli i skrótów .....	7
1. Cel ogólny i zakres pracy .....	8
2. Wprowadzenie i uzasadnienie celowości podjęcia tematu pracy .....	11
2.1. Osad kamienny .....	11
2.1.1. Usuwanie osadu kamiennego .....	14
2.1.2. Ekologiczne metody usuwania osadu kamiennego .....	14
2.2. Przegląd znanych rozwiązań przepływomierzy .....	15
3. Koncepcja pomiaru i konstrukcji przepływomierza .....	25
3.1. Prolegomena .....	25
3.2. Wybrane zagadnienia teorii mechaniki płynów.....	30
3.2.1. Liczby kryterialne i błędy pomiarowe.....	31
3.2.2. Definicja stałej czasowej .....	34
3.3. Dwukrokowy pomiar strumienia przepływu w kanale zakamienionym .....	35
3.4. Podsumowanie założeń wstępnych .....	36
4. Metodyka badawcza i zakres wykonanych prac.....	38
4.1. Wybór narzędzi badawczych.....	38
4.2. Przyjęta strategia badań.....	38
4.3. Szczegółowy zakres prac.....	39
5. Model numeryczny przepływomierza .....	42
5.1. Badanie wpływu rozmiaru siatki obliczeniowej.....	43
5.2. Dobór kroku czasowego .....	45

5.3. Modelowanie systemu pomiaru przepływu.....	46
6. Fizyczny model Simscape w środowisku MatLab .....	49
7. Stanowisko laboratoryjne i badania eksperymentalne.....	59
7.1. Wyniki pomiarów eksperymentalnych .....	63
7.2. Kalibracja modelu Simscape w środowisku MatLab .....	66
8. Wyniki badań analitycznych.....	67
8.1. Definicja wyniku pomiaru .....	67
8.2. Założenia upraszczające i parametry wpływu .....	69
8.3. Modelowanie systemu pomiaru grubości osadu kamiennego oraz pomiaru strumienia przepływu .....	72
8.4. Analiza błędów wyznaczania wartości grubości osadu oraz strumienia przepływu ....	76
8.5. Optymalizacja, wnioski i wytyczne konstrukcyjne .....	77
8.6. Konstrukcja czujnika w przepływomierzu .....	80
9. Analiza potencjalnych błędów pomiarowych.....	84
9.1. Wpływ dokładności pomiaru czasu.....	84
9.2. Błąd nadmiernej długości drogi pomiarowej .....	87
9.3. Analiza wpływu miejsca zamontowania przepływomierza, model numeryczny.....	90
10. Dyskusja osiągniętych celów pracy .....	94
11. Kierunki dalszych prac i badań .....	96
12. Podsumowanie i wnioski końcowe .....	97
Literatura .....	100
Streszczenie .....	117

Abstract .....	118
Spis rysunków .....	119
Spis tabel .....	123
Załącznik 1 .....	124
Załącznik 2 .....	128
Załącznik 3 .....	137
Załącznik 4 .....	149
Załącznik 5 .....	150

## Wykaz ważniejszych symboli i skrótów

<u>Symbol</u>	<u>Objaśnienie symbolu i jednostki</u>
$\rho$	gęstość płynu, $kg/m^3$
$v$	prędkość płynu, $m/s$
$L$	wymiar charakterystyczny, $m$
$M, \mu$	lepkość dynamiczna płynu, $Pa \cdot s$
$C$	pojemność cieplna przy stałym ciśnieniu, $J/K$
$c$	ciepło właściwe materiału masowego, $J/kg \cdot K$
$m$	masa, $kg$
$T$	temperatura, $K$
$t$	czas, $s$
$R$	opór cieplny, $m^2 K/W$
$Q$	strumień ciepła, $W$
$\Delta T$	różnica wartości temperatury, $K$
$d$	wymiar charakterystyczny, $m$
$A$	obszar normalny do kierunku przepływu ciepła, $m^2$
$k$	przewodność cieplna, $W/mK$
$\dot{m}$	masowe natężenie przepływu, $kg/s$
$V$	objętość płynu w rurze, $m^3$
$p$	ciśnienie płynu, $MPa$
$S$	pole przekroju poprzecznego rury, $m^2$
$\Delta p_v$	straty ciśnienia, $MPa$
$L_{eq}$	łączna długość równoważna lokalnych oporów rur, $m$
$D$	średnica hydrauliczną rury, $m$
$r$	chropowatość powierzchni rury, $\mu m$
$\Phi$	całkowite natężenie przepływu energii, $W$
$Q_H$	natężenie przepływu ciepła do rury przez ściankę rury, $W$
$Q_{conv}$	część natężenia przepływu ciepła przypisywana konwekcji przy niezerowych natężeniach przepływu, $W$
$S_H$	powierzchnia ścianki rury, $m^2$
$T_H$	temperatura na ściance rury, $K$
$\dot{m}_{avg}$	średnie masowe natężenie przepływu, $kg/s$
$c_p$	ciepło właściwe, $J/kgK$
$\nu$	kinematyczny współczynnik lepkości, $m^2/s$
$Re$	liczba Reynoldsa
$Pr$	liczba Prandtla
$h$	współczynnik przenikania ciepła w efekcie konwekcji, $W/m^2K$
$r$	współczynnik promieniowania, $Sv/Gy$ ; ( $rem/Gy$ )
$\beta$	izotermiczny moduł objętościowy rury, $m^3$
$\alpha$	izobaryczny współczynnik rozszerzalności cieplnej w rurze, $1/m$
$f$	współczynnik tarcia Darcy'ego
$\lambda$	współczynniki kształtu rury, $1/m$
<u>Skrót</u>	<u>Objaśnienie skrótu</u>
PCP	pierścieniowy czujnik przepływu
SCC	stała czasowa chłodzenia czujnika pierścieniowego
IoT	Internet rzeczy (ang. Internet of Things)
ZR	Zrównoważony Rozwój
GOZ	Gospodarka o Obiegu Zamkniętym
SDG	Sustainable Development Goals

## **1. Cel ogólny i zakres pracy**

Celem ogólnym niniejszej pracy jest wstępne opracowanie nowej konstrukcji urządzenia do pomiaru przepływu wody użytkowej, wpisującego się w założenia Przemysłu 4.0 i Internetu rzeczy, zdolnego do wieloletniej pracy w trudnych warunkach pomiarowych uwzględniających wodę zakamienioną. Założono, że działanie urządzenia pomiarowego powinno cechować się możliwie niską wrażliwością na obecność tworzących się warstw osadu kamiennego.

Świadomość poziomu zużycia wody wpływa pośrednio na racjonalne korzystanie z tego zasobu. Obecna technologia oraz prognozowany jej rozwój umożliwiają pozyskiwanie danych pomiarowych w czasie rzeczywistym. Założono, że konstrukcja czujnika przepływu (PCP) będącego przedmiotem badań, umożliwi wyznaczenie przepływu jedynie w oparciu o pomiar temperatury w czasie. Temperatura i czas należą do parametrów, których pomiar nie stanowi technicznego problemu i jest prosty oraz tani w realizacji. Współcześnie wiele urządzeń wykorzystuje potencjał obliczeniowy stosowanych mikrokomputerów, które informują użytkownika o różnych parametrach, analizując dane z niewielkiej liczby czujników pomiarowych. Przykładem mogą być smartwatche, tj. inteligentne zegarki, które monitorują wybrane parametry organizmu człowieka wykorzystując do tego sygnały z pojedynczych czujników. Celem niniejszej pracy jest implementacja zbliżonej idei w pomiarach przepływu wody, dzięki czemu urządzenia te będą mniej wrażliwe na wpływ warunków niepożądanych, dotąd skracających ich żywotność. Tego typu rozwiązania są potrzebne zwłaszcza przy sporych zmianach zachodzących w ogrzewnictwie gospodarstw domowych, domów jednorodzinnych, które coraz częściej ogrzewane są poprzez nowoczesne systemy grzewcze, takie jak pompy ciepła czy piece elektryczne skorelowane z akumulacją ciepła, szczególnie jednak przy wzrastających cenach wody. Odpowiednie i zapewniające długą żywotność opomiarowanie przepływów wody ale również procesów i instalacji energetycznych, jest kluczowe dla efektywnej ich eksploatacji. Założona prostota rozwiązania umożliwiłaby także wykorzystanie go w budynkach użyteczności publicznej i innych większych obiektach, gdzie kontrola zużycia wody jest procesem złożonym, gdyż jest pobór następuje w wielu punktach, a wewnętrzna sieć instalacji wodnej jest rozległa. Celem badawczym dla zagadnienia jest sprawdzenie możliwości wykonania pomiaru strumienia wody metodą termiczną w zakresie przepływu burzliwego za pomocą pomiaru wartości stałej czasowej.



Zakres niniejszej pracy obejmuje następujące zadania:

1. Zdefiniowanie potrzeb, analizę rynkową obecnie dostępnych i stosowanych rozwiązań (wykazanie braku rozwiązania o zbliżonej charakterystyce, zdefiniowanie niszy rynkowej).
2. Opis podstawowych czynników niekorzystnie wpływających na pomiar przepływu wody. Wybór metody pomiarowej.
3. Opracowanie wstępnych założeń technicznych do projektu przepływomierza.
4. Opracowanie sposobu pomiaru grubości warstwy osadu kamiennego w rurociągu.
5. Utworzenie modelu matematycznego przepływomierza.
6. Przygotowanie stanowiska badawczego oraz wykonanie pomiarów eksperymentalnych.
7. Kalibracja modelu w środowisku MatLab-Simscape, wstępne obliczenia symulacyjne.
8. Opracowanie tablic zależności stałej czasowej od grubości warstwy osadu kamiennego.
9. Założenia do budowy oprogramowania, schemat blokowy, opis idei działania programu (tablice zależności stałej czasowej od grubości warstwy osadu kamiennego).
10. Wykonanie obliczeń dla modeli matematycznego oraz fizycznego, analiza wyników i propozycja rozwiązań konstrukcyjnych PCP.
11. Rysunki techniczne zaproponowanego rozwiązania PCP.

Zakłada się, że przyrząd nie jest przyrządem rozliczeniowym, a raczej wskaźnikowym do masowego stosowania i uchwycenia wszystkich możliwych poborów wody. Jego cechą nadrzędną jest bardzo prosta konstrukcja, duża niezawodność działania, niewielkie wymiary, przystosowanie do pracy w sieci urządzeń IoT, możliwość zastosowania na wielką skalę i pracy w grupie, globalnie np. dla całego kompleksu hotelowego. Pozwala to na uchwycenie tego rodzaju pomiarów, których obecnie się nie wykonuje. Chodzi, np. o zarejestrowanie charakterystycznych zachowań użytkowników, godzin poboru wody ciepłej, wody zimnej, odpowiedzi, na pytanie które punkty poboru generują największe zużycie, etc. Należy zwrócić uwagę, że może to oznaczać instalację setek urządzeń na jednym obiekcie. To oczywiście wiąże się z koniecznością wprowadzenia zaawansowanych rozwiązań informatycznych, z których podstawowym rozwiązaniem będzie implementacja Internetu rzeczy. Nie jest możliwe, aby operator racjonalnie mógł analizować dane z tak dużej liczby urządzeń. Dlatego też, z punktu widzenia użytkownika, po zastosowaniu tych innowacyjnych rozwiązań informatycznych, system będzie widziany jako jedno urządzenie, w skład którego wchodzi wszystkie zainstalowane. Poszczególne urządzenia pomiarowe będą się komunikowały ze sobą i “wybierały” urządzenie nadrzędne. W przypadku gdy urządzenie nadrzędne ulega awarii to

system podporządkowuje kolejne jako nadrzędne. To wybrane urządzenie nadrzędne dostarczy użytkownikowi informacji o danych dotyczących wszystkich punktów pomiarowych wraz ze wstępną analizą statystyczną (rys. 3.4). Szczegóły tego typu rozwiązań można znaleźć w literaturze dotyczącej Internetu rzeczy i Przemysłu 4.0 [87], [148], [149]. W tym przypadku będzie to system dedykowany, zaprojektowany na potrzeby tego rozwiązania.

## **2. Wprowadzenie i uzasadnienie celowości podjęcia tematu pracy**

Temat pracy dotyczy próby opracowania konstrukcji przepływomierza o cechach pozwalających na prostą i tanią instalację w wielu punktach poboru wody z możliwością pracy w sieci urządzeń w kontekście zadań stawianych przed Przemysłem 4.0. Wpisuje się to bezpośrednio i pośrednio w cele gospodarki wodnej, gospodarowaniem jej zasobami, oszczędności surowców naturalnych i energii. Cele Zrównoważonego Rozwoju (ang. Sustainable Development Goals, w skrócie SDGs) to 17 celów globalnych (oznaczonych jako SDG1 do SDG17) przyjętych przez Zgromadzenie Ogólne Organizacji Narodów Zjednoczonych w 2015 roku. Zostały one sformułowane w ramach Agendy 2030 dla Zrównoważonego Rozwoju i mają na celu wyeliminowanie ubóstwa, ochronę planety i zapewnienie dobrobytu dla wszystkich ludzi. Dbanie o jakość wody oraz jej oszczędność wpisują się w SDG6 „Czysta woda i warunki sanitarne”, SDG9 „Innowacyjność, przemysł, infrastruktura”, SDG11 „Zrównoważone miasta i społeczności”, SDG13 Działanie w dziedzinie klimatu” [1]. Czynią one ten obszar badawczy ważnym i potrzebnym. Z tego też punktu widzenia podjęta tematyka jest istotna i uzasadniona. Wybrane zagadnienia dotyczące gospodarki wodnej, jako tematu ważnego, ale nie związanego bezpośrednio z tematem realizowanej pracy, zamieszczono w Załączniku.

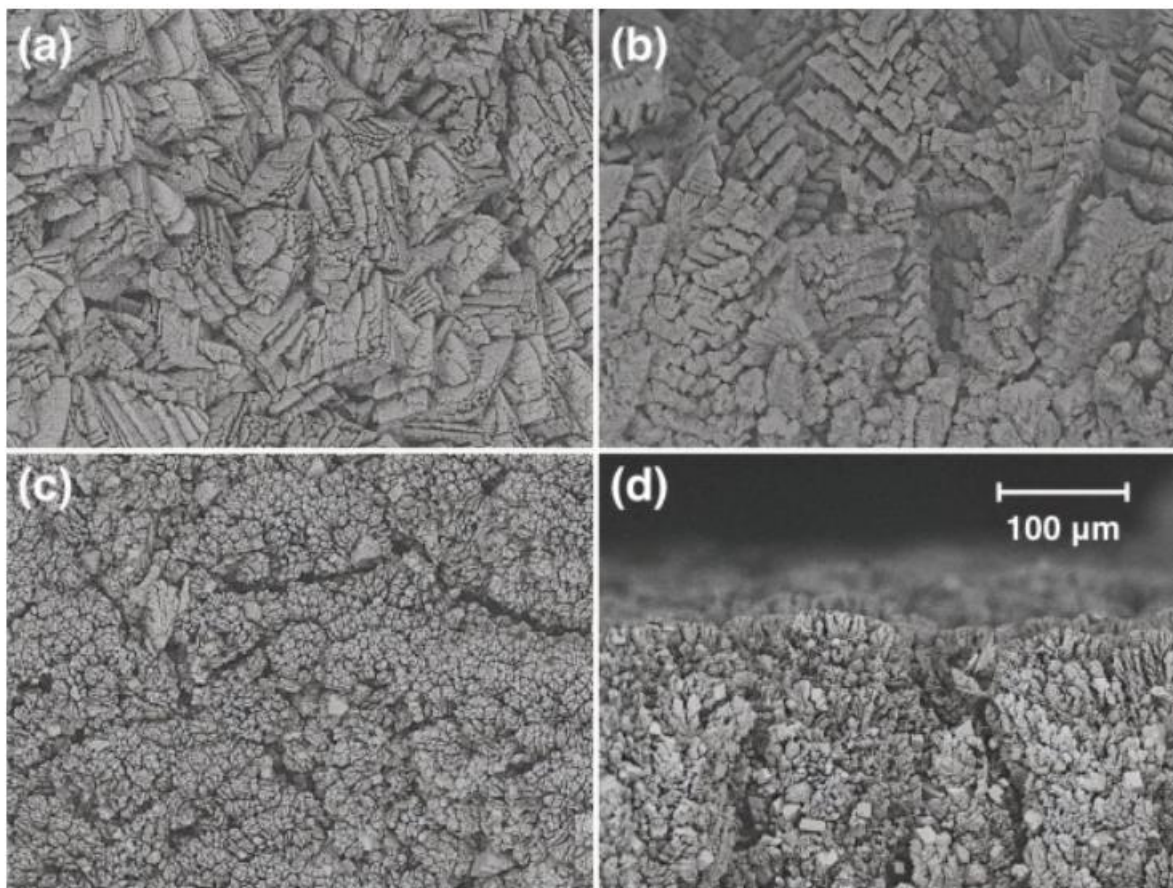
### **2.1. Osad kamienny**

Tworzenie się węglanu wapnia ( $\text{CaCO}_3$ ), inaczej zwanego kamieniem kotłowym lub wapiennym jest powszechnie występującym i znanym zjawiskiem. Wpływa ono negatywnie na pracę sieci wodociągowych, kotłów, wymienników ciepła oraz zaburza przepływy ze względu na zmniejszenie efektywnego przekroju rur [39], [40], [41]. Osad kamienny jest problemem w gospodarstwach domowych (osadzanie się kamienia w układach do podgrzewania wody), budownictwie mieszkaniowym (osadzanie się kamienia w rurach), czy przemyśle (w urządzeniach i instalacjach, etc.). Wieloletnia eksploatacja rurociągów w warunkach wody zakamienionej zaburza jej przepływ, zmniejsza efektywność i skraca żywotność urządzeń [42], [43].

Cząsteczki węglanu wapnia powstają z wiązania jonów wapnia i węglanu w roztworze wodnym, co przedstawiono w reakcji (1):



Na ilość osadzanego kamienia mają wpływ różne czynniki, np. zmiany ciśnienia, temperatury, przepływu lub stężenia jonów, które występują w całym okresie eksploatacji instalacji lub urządzeń [44]. Warstwa osadu kamiennego może narastać w wyniku heterogenicznego zarodkowania jonów na powierzchniach lub osadzania się masowych wcześniej istniejących (zarodkowanych lub zagregowanych) cząstek węglanu wapnia. W rzeczywistości kamień wapienny tworzy się „jon po jonie”, czyli osadzanie się kolejnych cząstek stałych [45], [46], [47]. Dynamika narastania warstw w stanie równowagi jest procesem złożonym [48], [49], [50], jednak można ją opisać za pomocą modelowania matematycznego lub zaobserwować eksperymentalnie [51], [52]. Jako przykład eksperymentu może posłużyć badanie przepływu w kapilarach, gdzie zadając różne wartości ciśnień i temperatury odtwarzane są warunki rzeczywistego przepływu [53]. W warunkach rzeczywistych powstawanie warstwy kamienia nie rozwija się quasi-statycznie. Występujące turbulencje, różne i zmieniające się warunki brzegowe oraz parametry wpływają na zmienne w czasie powstawanie osadu kamiennego. Na rysunku 2.1 przedstawiono obrazy osadu kamienia wapiennego wykonane za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Osad powstał w przesyconym wodnym roztworze węglanu wapnia, w warunkach przepływu turbulentnego rurowego, w temperaturze pokojowej i ciśnieniu atmosferycznym na wylocie. Na rysunkach 2.1a i 2.1c przedstawiono obrazy przekroju poprzecznego kanału, na rysunku 2.1b i 2.1d obrazy przekroju wzdłużnego. Zdjęcia wykonano za pomocą mikroskopu skaningowego (rys. 2.1a, 2.1b, 2.1c, 2.1d). Tworzenie się warstwy osadu kamiennego w pobliżu wlotu poprzez spiętrzanie i „układanie” obok siebie połamanych krystalicznych kawałków węglanu wapnia pokazano na rys. 2.1a i 2.1b. Przedstawione obrazy ilustrują trudne warunki pomiarowe, które uwzględniono przy konstrukcji przepływomierza (PCP) [39].



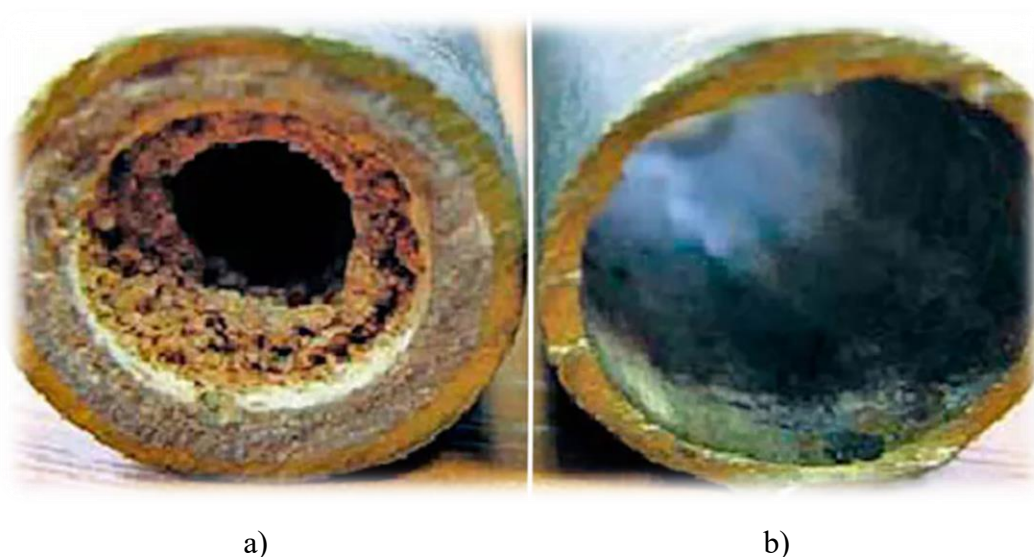
Rys. 2.1. Widok obrazu z mikroskopu skaningowego próbki osadu węglanu wapnia w przekroju poprzecznym rury a), c) i wzdłużnym rury b), d) [39]

Fig. 2.1. View of scanning microscope image of calcium carbonate deposit sample in cross-section of pipe a), c) and longitudinal section of pipe b), d)

Warstwa osadu kamiennego, który tworzy się wewnątrz rur zwiększa opory przepływu wody, zmniejsza wydajność systemu wodociągowego i wpływa niekorzystnie na zużycie energii. W skrajnych przypadkach może nawet całkowicie uniemożliwić przepływ wody i prowadzić do awarii. Osad kamienny powstający wewnątrz rur obniża efektywność urządzeń podgrzewających wodę takich jak bojler, zmywarka czy pralki. Zwiększa to zużycie energii i czas potrzebny do wykonania tych czynności. Osad kamienny przyspiesza procesy, które mają wpływ na degradację, pęknięcia lub wycieki, co może wymagać kosztownych napraw oraz niepotrzebne nadmierne zużycie wody [54], [55], [56].

Rury, których efektywny przekrój został zmniejszony przez warstwę osadu kamiennego transportuje wodę mniej efektywnie, co może prowadzić do wzrostu kosztów eksploatacyjnych, a także do konieczności częstszego przeprowadzania napraw i konserwacji systemu wodociągowego. W niektórych przypadkach osad kamienny może sprzyjać rozwojowi bakterii i innych mikroorganizmów, które mogą wpływać na jakość wody [57]. Na rysunku 2.2

przedstawiono widok przekroju poprzecznego rury przed i po oczyszczeniu z nagromadzonego kamienia wapiennego.



Rys. 2.2. Widok przekroju poprzecznego rury: a) z osadem kamiennym, b) po usunięciu osadu kamiennego

Fig. 2.2. View of cross section of pipe: a) with scale deposit, b) after removal of scale deposit

### **2.1.1. Usuwanie osadu kamiennego**

Przeanalizowano możliwości rozwiązania problemu osadzania się kamienia, aby rozpoznać dotychczasowe sposoby zarządzania siecią wodociągową narażoną na wpływ wody twardej i opisano obecnie stosowane metody, celem wykazania złożoności tych procesów. Powoduje to potrzebę wykonania pomiaru pomimo występującej warstwy osadu.

Usuwanie warstwy kamienia wapiennego z rur i urządzeń metodami chemicznymi związane jest z zastosowaniem środków chemicznych mających negatywny wpływ na środowisko. Jednak istnieją opracowane metody bardziej ekologiczne, takie jak wykorzystanie ultradźwięków, urządzeń elektromagnetycznych oraz metody mechaniczne. W związku z naciskiem ze strony Organizacji Narodów Zjednoczonych (ONZ) oraz Unii Europejskiej na wdrażanie rozwiązań bardziej przyjaznych środowisku, w obszarze usuwania kamienia metodami ekologicznymi istnieje przestrzeń na innowacje [1], [18], [58], [59], [60], [61].

### **2.1.2. Ekologiczne metody usuwania osadu kamiennego**

Do ekologicznych metod usuwania osadu kamiennego zalicza się metody mechaniczne, przy których wykorzystuje się narzędzia, takie jak szczotki, pędzle, miotłki, wodne piaskarki, lub maszyny ciśnieniowe, które nie wymagają użycia chemikaliów ani środków chemicznych

do usuwania kamienia. W przypadkach, gdy mechaniczne metody są niewystarczające, można skorzystać z biodegradowalnych środków ułatwiających usuwanie osadu kamiennego. Warstwa osadu kamiennego może również być usuwana za pomocą pary wodnej. Czysta para może być używana do usuwania kamienia, gdy jest skierowana na zanieczyszczenia pod wysokim ciśnieniem. Jest to ekologiczna metoda, ponieważ nie wymaga użycia żadnych chemicznych detergentów. Ponadto niektóre organizmy biologiczne, takie jak bakterie i enzymy, mogą być wykorzystywane do naturalnego rozkładania kamienia. Istnieją również ekologiczne środki zawierające mikroorganizmy, które w naturalny sposób eliminują osad kamienny [62], [63], [64]. W przemyśle wykorzystuje się również metody ultradźwiękowe.

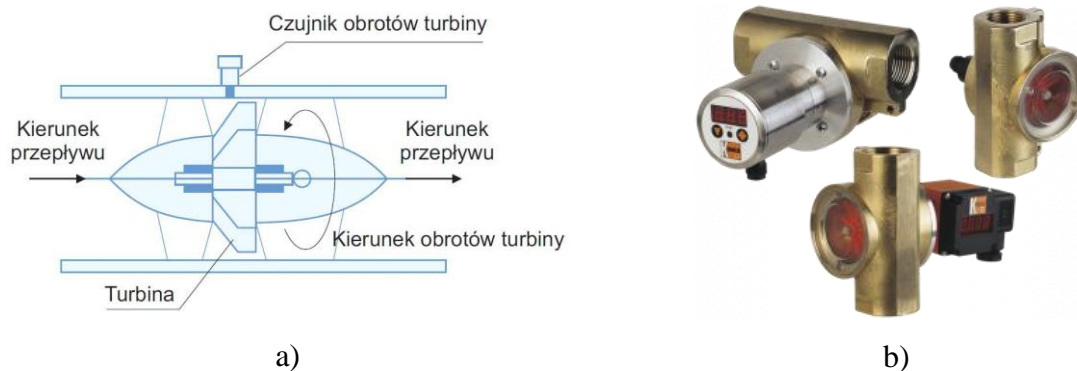
## **2.2. Przegląd znanych rozwiązań przepływomierzy**

Dokonano przeglądu aktualnych rodzajów przepływomierzy dostępnych na rynku oraz oceny zastosowanej w nich metody pomiarowej w celu wytypowania metody pomiarowej najbardziej odpowiedniej dla konstruowanego w pracy przyrządu.

Przepływomierze do pomiaru strumienia wody można podzielić ze względu na różne kryteria. Najbardziej podstawowym podziałem jest podział ze względu na rodzaj uzyskiwanego wyniku pomiaru, w jednostkach masy czy objętości na jednostkę czasu. Innym kryterium jest czas pomiaru; tu rozróżnić można przepływomierze dostarczające informacji o przepływie średnim lub chwilowym. Ze względu na konstrukcję rozróżnić można przepływomierze wykorzystujące ustrój pomiarowy mechaniczny, wykorzystujące zjawiska falowe lub oddziaływanie elektromagnetyczne, bezwładnościowe (Coriolisa), termiczne, wykorzystujące spadek ciśnienia i inne. Ze względu na potencjalnie projektowaną małą wrażliwość na osadzanie się warstwy kamiennej, istotny wydaje się podział przepływomierzy na posiadające, lub nie posiadające elementów ruchomych. Obecność elementów ruchomych w konstrukcji przepływomierza jest niekorzystna uwzględniając oddziaływanie osadu kamiennego.

- Przepływomierze turbinowe

Istnieje wiele rodzajów przepływomierzy mechanicznych, z których każdy ma swoje charakterystyki i zastosowania. Jednymi z najbardziej popularnych są przepływomierze turbinowe. Ustrojem pomiarowym jest w tym przypadku obrotowy wirnik. Liczba obrotów wirnika jest proporcjonalna do ilości płynu, która przepłynęła przez łopatki wirnika. Schemat i widok urządzenia przedstawiono odpowiednio na rys. 2.3a i 2.3b.



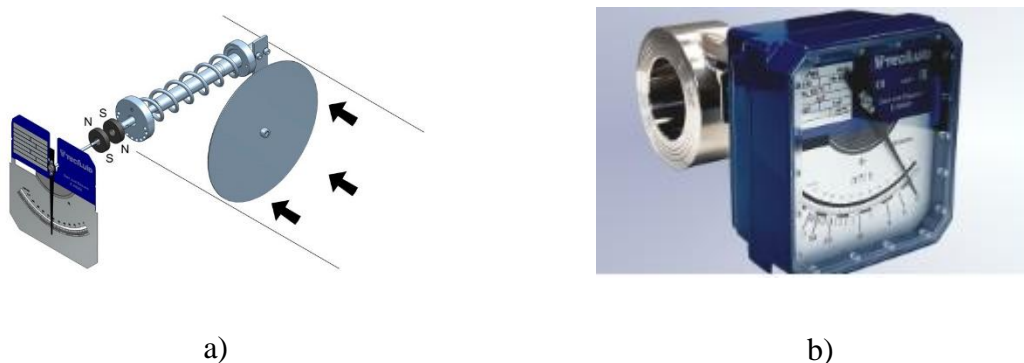
Rys. 2.3. Przepływomierz turbinowy: a) schemat zasady działania, b) widok urządzenia [65]

Fig. 2.3. Turbine flowmeter: a) scheme of the operating principle, b) view of device

Konstrukcja tego typu nie jest odporna na oddziaływanie wody twardej. Osadzający się kamień może powodować degradację profilu łopatek wirnika i trudną do oszacowania utratę precyzji.

- Przepływomierze tarczowe

Przepływomierze tarczowe składają się z tarcz przymocowanych do osi usytuowanych prostopadle do kierunku przepływu cieczy. Siła naporu wywierana przez przepływ cieczy powoduje obrót osi, natomiast nawinięta na wał sprężyna przeciwdziała temu zjawisku. Gdy siły się równoważą, osiągnięta jest pozycja stabilna. Kąt obrotu tarczy odpowiada danemu natężeniu przepływu. Przykład przepływomierza tarczowego przedstawiono na rysunku 2.4.



Rys. 2.4. Przepływomierz tarczowy: a) schemat zasady działania, b) widok urządzenia [66]

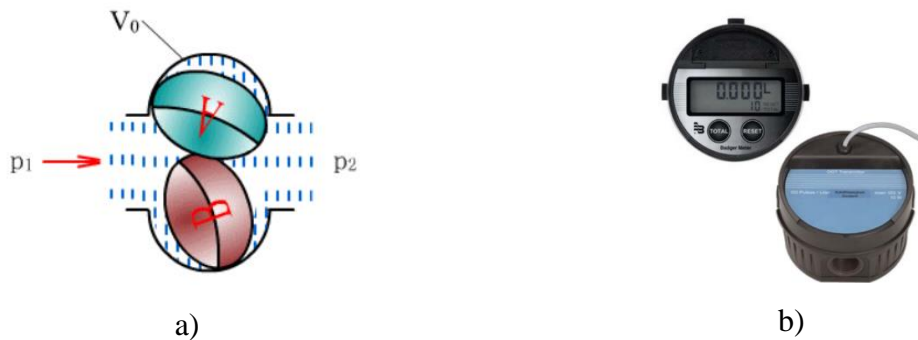
Fig. 2.4. Disc flowmeter: a) scheme of the principle of operation, b) view of device

Konstrukcja tego typu nie jest odporna na wpływ wody twardej. Osadzający się kamień może powodować przede wszystkim problem w pracy wału, a zmiana masy samej tarczy wpłynie dodatkowo na dokładność pomiaru.



- Przepływomierze zębate

Przepływomierze zębate należą do grupy przepływomierzy objętościowych. Wykorzystują one dwa współpracujące specjalne koła zębate, które obracają się w przeciwnych kierunkach w wyniku przepływu płynu. Liczba obrotów kół jest związana z ilością przepływającej cieczy. Przykład przepływomierza zębatego przedstawiono na rysunku 2.5.



Rys. 2.5. Przepływomierz owalno-zębaty: a) schemat zasady działania, b) widok urządzenia [67]

Fig. 2.5. Oval-gear flowmeter: a) scheme of the principle of operation, b) view of device

Konstrukcja tego typu nie jest odporna na wpływ wody twardej. Osadzający się kamień może powodować przede wszystkim problem w pracy kół zębatych.

- Przepływomierze tłokowe

Inną kategorią są urządzenia wyporowe, do których zalicza się przepływomierze tłokowe oraz membranowe. Ruch tłoka lub membrany powoduje cykliczne napełnianie i opróżnianie objętości kontrolnej, kolejne cykle są zliczane w czasie i na tej podstawie wyznaczany jest przepływ objętościowy. Przykład przepływomierza tłokowego przedstawiono na rysunku 2.6.

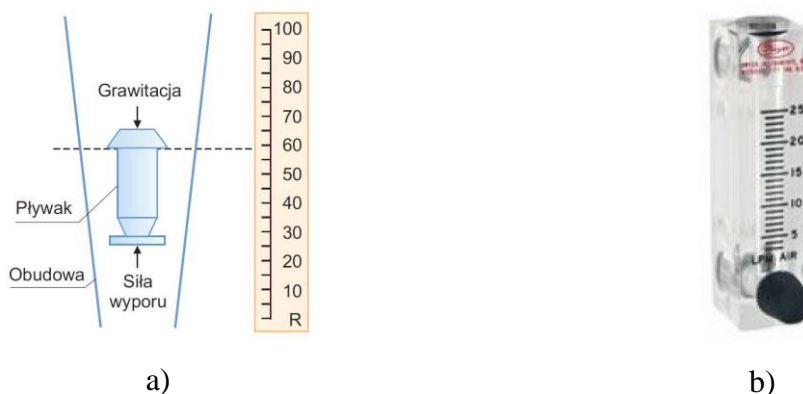


Rys. 2.6. Przepływomierz tłokowy: a) przekrój urządzenia z elementami składowymi, b) widok urządzenia [68]  
Fig. 2.6. Piston flowmeter: a) cross-section including its components, b) view of device

Konstrukcja tego typu nie jest odporna na wpływ wody twardej. Osadzający się kamień może powodować przede wszystkim problem w pracy elementu wyporowego jak również zmiany objętości czynnej komory pomiarowej.

- Przepływomierze pływakowe

Przepływomierze pływakowe (rotametry) składają się z rurki z pływakiem, który unosząc się w płynie osiąga równowagę pomiędzy siłą wyporu, a siłą grawitacji. Wysokość pływaka w rurce jest wskaźnikiem przepływu. Przykład przepływomierza pływakowego przedstawiono na rysunku 2.7.

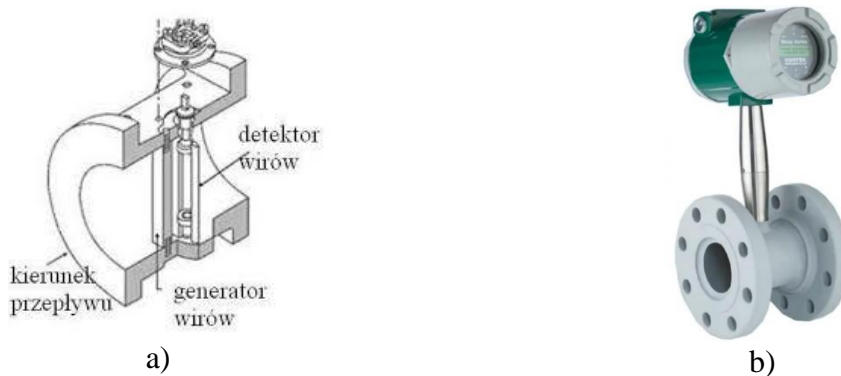


Rys. 2.7. Przepływomierz pływakowy (rotametr): a) schemat zasady działania, b) widok urządzenia [69]  
Fig. 2.7. Float flowmeter (rotameter): a) scheme of the principle of operation, b) view of device

Konstrukcja tego typu nie jest odporna na wpływ wody twardej. Osadzający się kamień może powodować przede wszystkim problem w pracy pływak zmieniając jego masę, ale też zwężając przestrzeń, w której porusza się pływak.

- Przepływomierze wirówkowe

Przepływomierze wirówkowe (wirowe) wykorzystują tworzenie wirów w płynie w wyniku przepływu. Charakterystyki wirów są mierzone i używane do obliczenia przepływu. Przykład przepływomierza wirowego przedstawiono na rysunku 2.8.



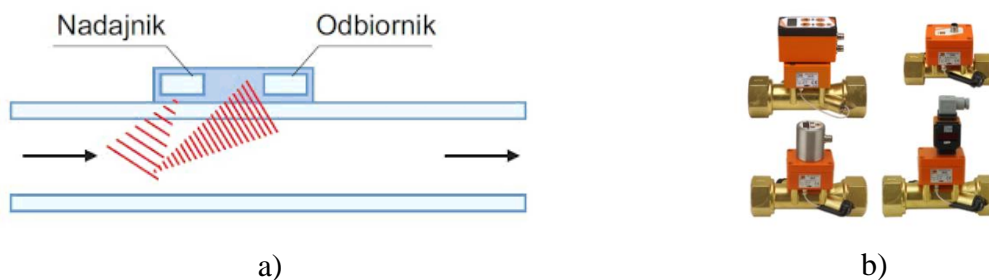
Rys. 2.8. Przepływomierz wirowy: a) przekrój urządzenia, b) widok urządzenia [70]

Fig. 2.8. Vortex flowmeter: a) cross-section of the device, b) view of device

Konstrukcja tego typu nie jest odporna na wpływ wody twardej. Osadzający się kamień może zaburzać przepływ i wpływać na tworzenie się wirów oraz zmniejszać efektywną średnicę kanału.

- Przepływomierze ultradźwiękowe

Przepływomierze ultradźwiękowe wykorzystują fale ultradźwiękowe, które są wysyłane przez nadajnik i odbijane od cząstek zawartych w płynie. Na podstawie zmian w czasie propagacji fal można określić prędkość przepływu. Przykład przepływomierza ultradźwiękowego przedstawiono na rysunku 2.9.



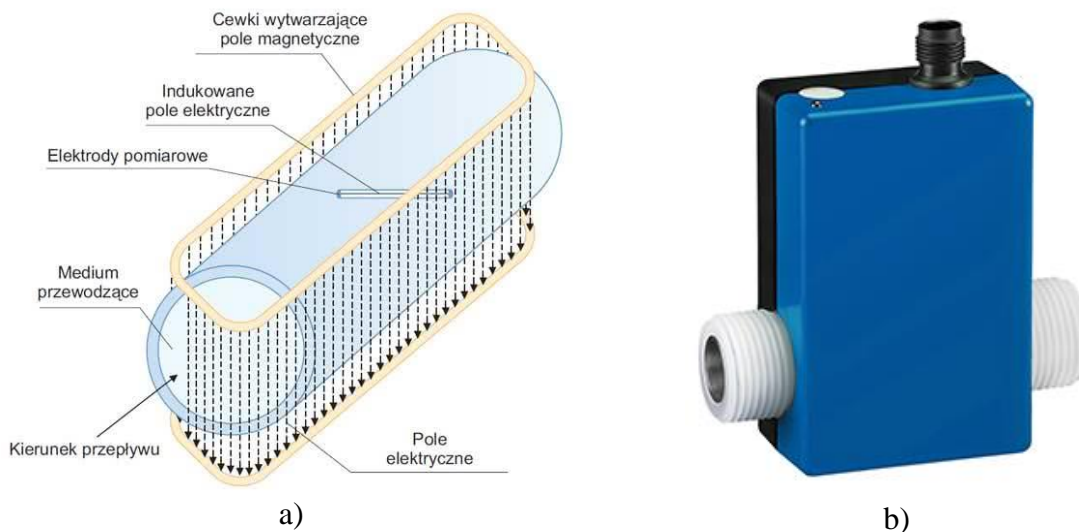
Rys. 2.9. Przepływomierz ultradźwiękowy: a) zasada działania, b) widok urządzenia [71]

Fig. 2.9. Ultrasonic flowmeter: a) principle of operation, b) view of the device

Konstrukcja tego typu nie jest odporna na wpływ wody twardej. Osady fałszują wyniki pomiarów tego typu przepływomierzy, ze względu na zmianę efektywnej średnicy przekroju kanału oraz ich warstwa może mieć wpływ na propagację (tłumienie) fal ultradźwiękowych.

- Przepływomierze elektromagnetyczne

Przepływomierze elektromagnetyczne wykorzystują do pomiaru napięcie indukowane w elektrodach pomiarowych zanurzonych w strudze cieczy przez pole magnetyczne. Przykład przepływomierza elektromagnetycznego przedstawiono na rysunku 2.10.



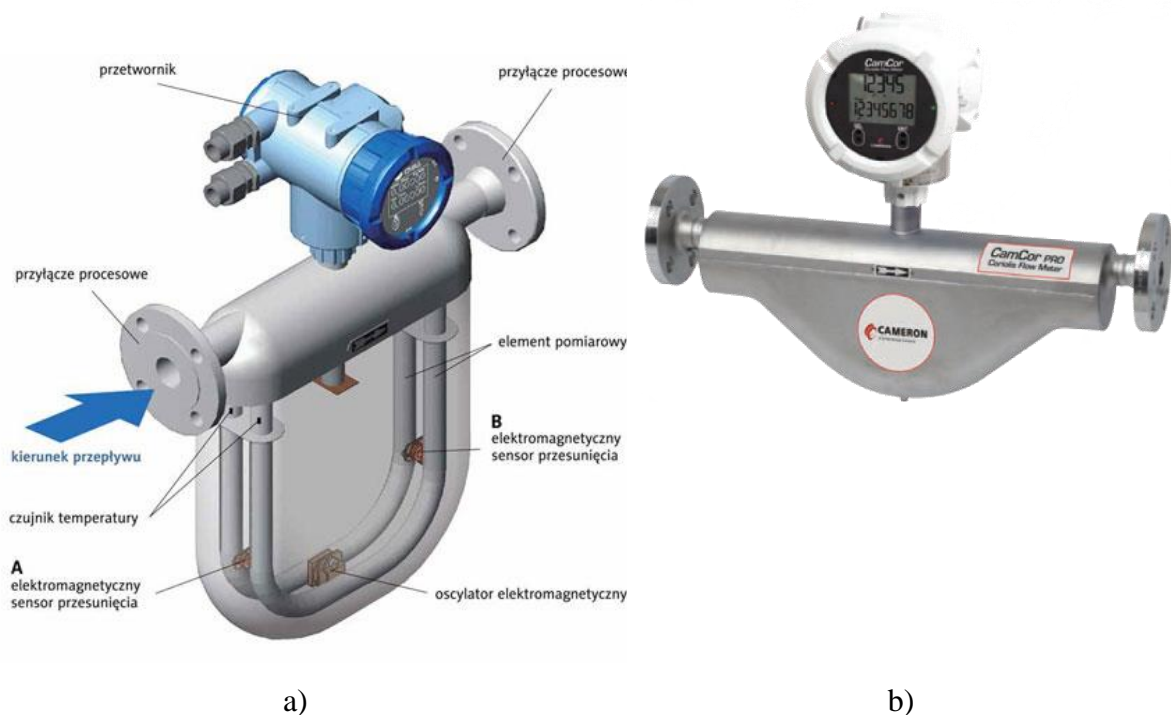
Rys. 2.10. Przepływomierz elektromagnetyczny: a) schemat zasady działania, b) widok urządzenia [72]

Fig. 2.10. Electromagnetic flowmeter: a) scheme of the principle of operation, b) view of device

Konstrukcja tego typu nie jest odporna na wpływ wody twardej. Osad kamienny powstający na elektrodach lub w kanale powodować będzie błędy pomiarowe.

- Przepływomierze Coriolisa

Przepływomierze Coriolisa bazują na efekcie Coriolisa, czyli siłach działających na ciało w ruchu obracającym się w układzie nieinercyjnym. Przykład przepływomierza Coriolisa przedstawiono na rysunku 2.11.



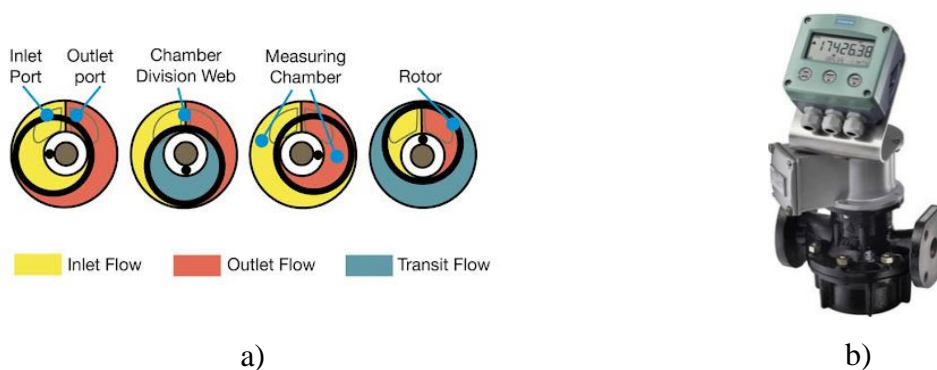
Rys. 2.11. Przepływomierz Coriolisa: a) schemat zasady działania, b) widok urządzenia [73]

Fig. 2.11. Coriolis flowmeter: a) scheme of the principle of operation, b) view of device

Tego typu rozwiązanie nie jest odpowiednie dla obszaru zastosowań analizowanego w niniejszej pracy. Ponadto warstwa osadu kamiennego wpływa na masę części ruchomych, co wpływa na dokładność pomiaru.

- Przepływomierze tłokowo-pierścieniowe

Do przepływomierzy mechanicznych należą również tłokowo-pierścieniowe, o dokładności pomiarowej 0.2%, w zależności od lepkości medium. Mogą być produkowane w wersji kwasoodpornej, gdzie wartości temperatury medium mogą mieścić się w granicach od -30 do +300°C. Przykład przepływomierza przedstawiono na rysunku 2.12.



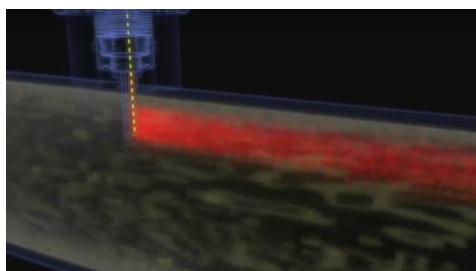
Rys. 2.12. Przepływomierz tłokowo-pierścieniowy: a) schemat zasady działania, b) widok urządzenia [74]

Fig. 2.12. Piston-ring flowmeter: a) scheme of the principle of operation, b) view of device

Konstrukcja tego typu nie jest odporna na wpływ wody twardej. Osadzający się kamień może powodować zaburzenia pracy tłoka i ograniczać przepływ cieczy.

Wspólnym problemem przepływomierzy jest tworzący się na elementach pomiarowych osad kamienny. W każdym z wymienionych powyżej przypadków wpływa on destrukcyjnie na elementy czynne przepływomierzy lub zaburza a nawet uniemożliwia prawidłowy pomiar. Obiecująca wydaje się grupa rozwiązań bazujących na termicznych metodach pomiarowych. Metody termiczne nie wymagają stosowania żadnych elementów ruchomych, sam pomiar sprowadza najczęściej się do pośredniego pomiaru temperatury lub prądu. Tego typu parametry są łatwo mierzalne, a ich realizacja techniczna jest stosunkowo tania. Obecnie prawie nie stosuje się tej metody do pomiaru przepływu cieczy.

Pierwszy termiczny przepływomierz masowy do pomiaru cieczy to produkt o nazwie Proline t-mass T 150 (rys. 2.14) [96]. Zasada jego działania oparta jest o podwójny pomiar temperatury wskazywanej przez czujniki umieszczone w rurze, w której przepływa woda. Pierwszy czujnik (referencyjny) wskazuje temperaturę wody, natomiast drugi czujnik ogrzewany jest prądem elektrycznym tak, aby wartość temperatury była wyższa od temperatury wskazanej przez czujnik referencyjny. Prąd elektryczny, którym ogrzewany jest czujnik jest tym większy im szybciej następuje jego chłodzenie, co zależne jest od strumienia przepływającej cieczy. Umieszczenie czujników w rurze w sposób przewidziany dla urządzenia Proline t-mass T 150 [75], może przyspieszać osadzanie się kamienia na elementach pomiarowych, co będzie zaburzało pomiar strumienia przepływającej wody [76], [77], [78].



a)

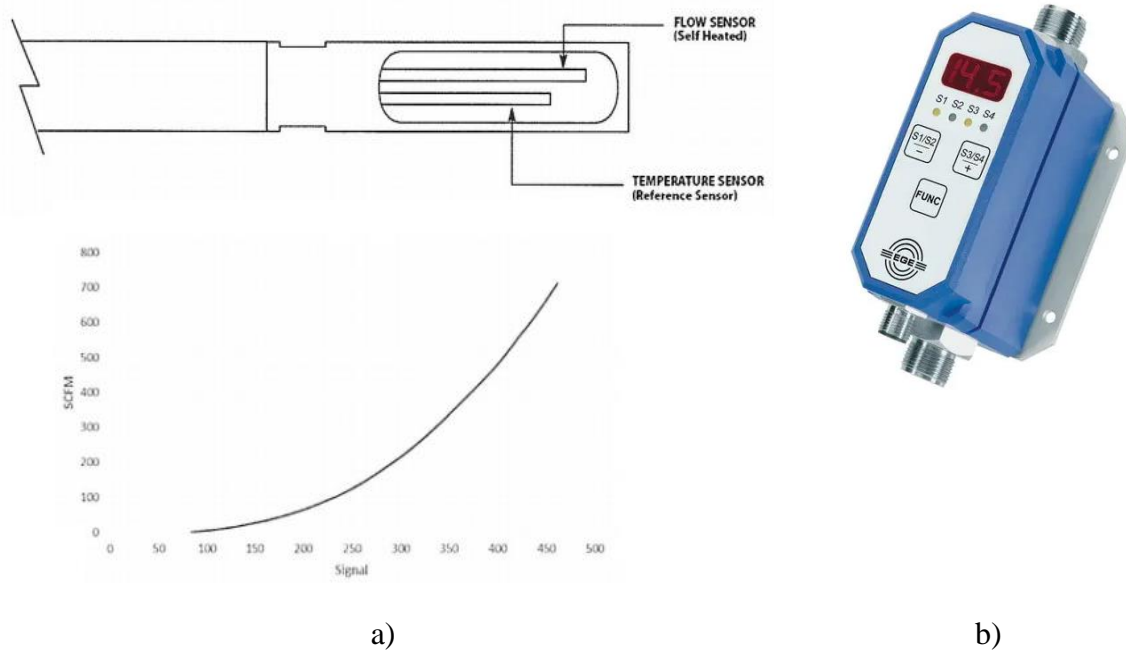


b)

Rys. 2.13. Termiczny przepływomierz masowy T 150 firmy Endress+Hauser: a) widok zasady działania, b) widok urządzenia [75]

Fig. 2.13. Thermal mass flow meter T 150 from Endress+Hauser: a) view of the operating principle, b) view of the device

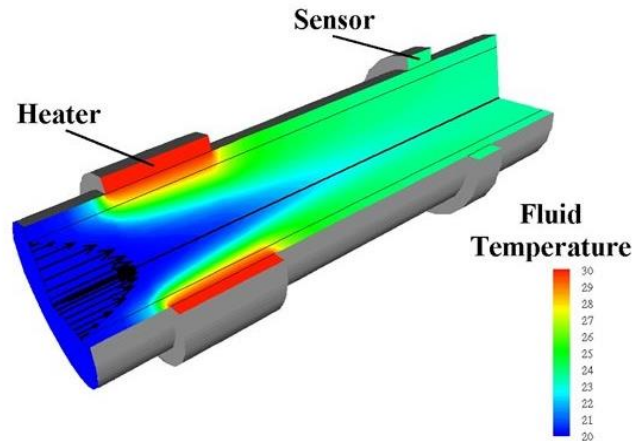
Inne rozwiązanie termicznego przepływomierza masowego do wody to przepływomierz SDN 550, który przedstawiono na rysunku 2.15



Rys. 2.14. Termiczny przepływomierz masowy SDN 550: a) schemat konstrukcyjny z krzywą kalibracji, b) widok urządzenia [79]

Fig. 2.14. SDN 550 thermal mass flowmeter: a) construction diagram with calibration curve, b) view of device

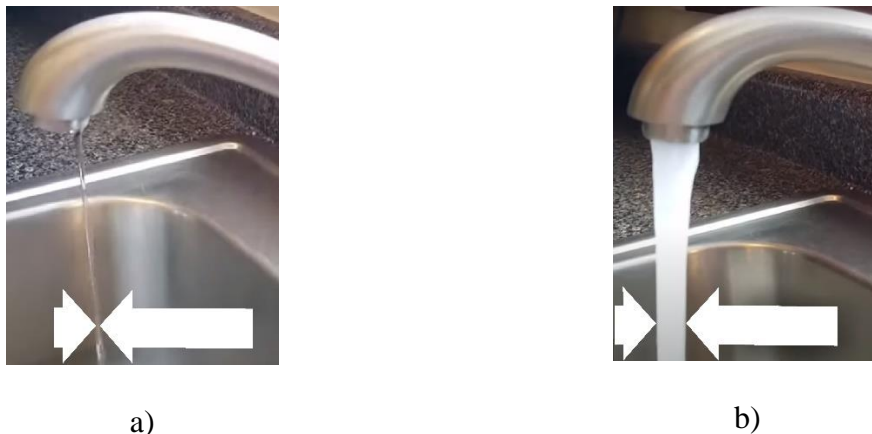
Urządzenie składa się z dwóch czujników temperatury. Pierwszy jest czujnikiem referencyjnym. Drugi, pracujący jako czujnik przepływu, jest podgrzewany i w celu utrzymania niewielkiej różnicy wartości temperatury powyżej pierwszego czujnika konieczne jest dostarczanie różnej ilości energii w zależności od natężenia przepływu. Przyrząd mierzy ilość energii niezbędnej do utrzymania założonej różnicy wartości temperatury. Dokładność pomiaru wynosi 10 do 15% w zależności od temperatury medium. Jedną z wielu zalet tego typu pomiaru jest odporność na zabrudzenia cieczy. Na rysunku 2.16 przedstawiono konstrukcję ogólną tego przepływomierza [79]. Rozwiązanie to jest tylko pozornie zbliżone konstrukcyjnie do rozwiązania omawianego w dalszej części pracy; zarówno zasada działania jak i budowa jest odmienna [80], [81], [82], [83].



Rys. 2.15. Model obrazujący sposób działania przepływomierza termicznego [75]

Fig. 2.15. A model showing how the thermal flowmeter works

Zakłada się zakresy pomiarowe dla PCP, że są charakterystyczne dla armatury domowej. Przepływ wody może wahać się w granicach od około 0.05 kg/s do 0.3 kg/s. Na rysunku 2.16 przedstawiono maksymalne oraz minimalne natężenie przepływu wody w armaturze domowej.



Rys. 2.16. Widok natężenia przepływu w armaturze domowej: a) minimalny, b) maksymalny. Zakres przepływu w granicach od 0.05 kg/s do 0.3 kg/s

Fig. 2.16. View of the flow rate in the house fixtures: a) minimum, b) maximum. Flow rate range from 0.05 kg/s to 0.3 kg/s

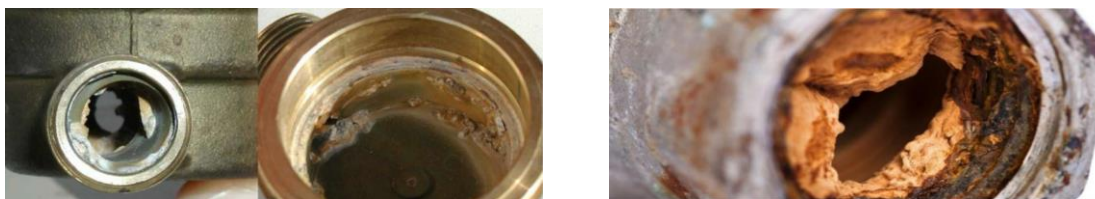
Obecnie dostępnych jest wiele rodzajów przyrządów do pomiaru przepływów cieczy, jednak nie wypełniają one założeń przyjętych w tej pracy. Zaprezentowany w dalszej części pracy przepływomierz ma być w założeniach zgodny z przesłankami Przemysłu 4.0 oraz Internetem rzeczy (IoT). Docelowa konstrukcja będzie mogła być niezależnym elementem pomiarowym lub stanowić część urządzenia lub/i inteligentnych systemów [84], [85], [86]. Zaproponowane rozwiązanie uwzględni w algorytmie pomiarowym ewentualną obecność warstwy osadu kamiennego.



### **3. Koncepcja pomiaru i konstrukcji przepływomierza**

#### **3.1. Prolegomena**

Opracowanie nowej konstrukcji przepływomierza lub chociażby sygnalizatora przepływu jest zadaniem bardzo ryzykownym ze względu na dużą liczbę opracowanych i przebadanych rozwiązań. Wydaje się być trudnym zaproponowanie oryginalnego rozwiązania, które nie zostało już wcześniej przebadane. Patrząc na zagadnienie z innej strony to zazwyczaj systemy pomiarowe buduje się zastrzegając, że prawidłowa praca możliwa jest jedynie przy braku czynników niekorzystnych. Nie uwzględnia się ich długotrwałej eksploatacji w warunkach mogących wpływać na degradację urządzenia (rys. 3.1). Nie są obecnie znane Autorowi rozwiązania przepływomierzy, które uwzględniają obecność osadu kamiennego i uwzględniają ten fakt w konstrukcji przepływomierza. Z tego punktu widzenia przedstawiona tematyka jest innowacyjna i oryginalna. Biorąc pod uwagę planowane rozwiązania elektroniki pomiarowej wpisuje się również w koncepcję Przemysłu 4.0 i Internetu rzeczy.



Rys. 3.1. Widok fragmentów przepływomierzy zniszczonych przez osad kamienny

Fig. 3.1. View of elements of flow meters damaged by scale deposits

Przemysł 4.0, czyli czwarta rewolucja przemysłowa to kolejny etap w rozwoju gospodarki i społeczeństwa, w którym nowoczesne technologie i procesy mają duży wpływ na transformację miejsc pracy i całych gospodarek. W tej nowej erze, digitalizacja, automatyzacja, sztuczna inteligencja, Internet rzeczy (IoT) i uczenie maszynowe stają się coraz bardziej powszechne i przenikają do różnych dziedzin życia oraz biznesu. Połączenie świata fizycznego oraz wirtualnego tworzy możliwości dla przedsiębiorstw do stworzenia ekosystemu cyfrowego, w którym różne elementy są połączone i pozwalają na podejmowanie bardziej świadomych decyzji. Dzięki analizie danych pozyskiwanych z różnych urządzeń i czujników w czasie rzeczywistym można uzyskać kluczowe informacje niezbędne do funkcjonowania i rozwoju inteligentnej infrastruktury pomiarowej. W przedsiębiorstwie, w którym wykorzystuje się ekosystem cyfrowy dane zebrane z systemów i maszyn są wykorzystywane do inteligentnego zarządzania organizacją, co skutkuje większą efektywnością działań. Ta rewolucja

przemysłowa wiąże się z powstaniem nowych produktów i usług, bardziej atrakcyjnych form obsługi klientów, pojawieniem się nowych zawodów oraz całkowicie nowych modeli biznesowych, które nierzadko powstają jako efekt uboczny tych zmian [87].

Internet rzeczy (IoT) to koncepcja, która odnosi się do sieci połączonych urządzeń, obiektów fizycznych i innych przedmiotów, które są zdolne do zbierania i wymiany danych za pośrednictwem Internetu. Celem IoT jest umożliwienie komunikacji między różnymi urządzeniami, takimi jak smartfony, komputery, czujniki, urządzenia typu "wearable", urządzenia domowe, maszyny przemysłowe, pojazdy i wiele innych. Dzięki połączeniu tych różnych urządzeń, mogą one współpracować, wymieniać informacje i podejmować działania automatycznie lub na żądanie użytkownika. Przykładem może tu być, inteligentny dom wyposażony w czujniki monitorujące temperaturę, oświetlenie, stan otwarcia drzwi i okien, a te informacje mogą być dostępne i kontrolowane zdalnie przez użytkownika za pośrednictwem aplikacji na smartfonie. Internet rzeczy wykorzystuje różnego rodzaju technologie komunikacyjne, takie jak Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, NFC (Near Field Communication) i inne, aby umożliwić bezprzewodową komunikację między urządzeniami. Zastosowania IoT są bardzo różnorodne i obejmują wiele obszarów, takich jak inteligentne miasta, zdrowie i opieka medyczną, rolnictwo, przemysł, logistyka, transport, rozrywka i wiele innych. Jednak wraz z rosnącą liczbą wykorzystywanych urządzeń, pojawiają się również wyzwania związane z prywatnością, bezpieczeństwem danych i zarządzaniem tak rozległą infrastrukturą. Dlatego ważne jest, aby odpowiednio zabezpieczać urządzenia IoT i dane w celu uniknięcia potencjalnych zagrożeń dla użytkowników i sieci [88], [89], [90], [91].

Rozważając różne pola możliwych rozwiązań oraz mając na uwadze najnowsze osiągnięcia technologiczne, jak również analizując znane konstrukcje przepływomierzy opisane wcześniej, zaproponowano wykorzystanie specjalnej konstrukcji czujnika temperatury do oceny stanu zakamienienia rurociągu w pierwszym kroku pomiarowym, a następnie pomiaru przepływu w drugiej fazie pomiaru.

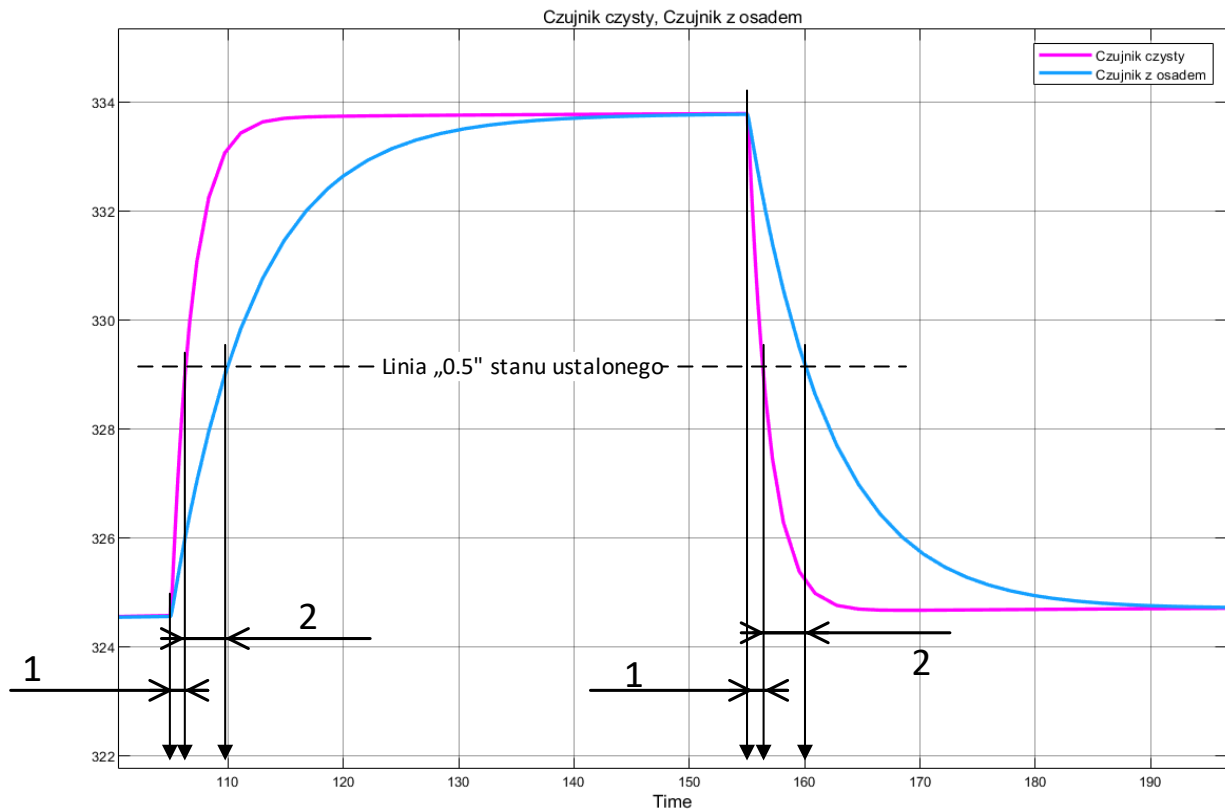
Pomiar temperatury jest powszechnie znany i wykorzystywany w procesach przemysłowych, medycynie, prognozach pogody i wielu innych obszarach niewymagających objaśnień. Pomiar temperatury, w tym pomiar temperatury wody, jest wyczerpująco opisany od strony teoretycznej.

Koncepcja proponowanego rozwiązania wykorzystuje pomiar przepływu metodą termiczną i należy do grupy rozwiązań pomiarów masowych. Zasadę działania przepływomierza oparto o zależność stałej czasowej<sup>1</sup> specjalnego czujnika temperatury (SCC) od strumienia przepływu wody wewnątrz rurociągu. Ta idea jest w pewnym ogólnym sensie pokrewna do zasady działania termicznych przepływomierzy masowych stosowanych do gazów [92], niemniej szczegółowe rozwiązanie jest całkowicie odrębne. Termiczne przepływomierze masowe bazują na dwóch czujnikach temperatury, gdzie bada się prąd niezbędny do utrzymania założonych warunków termicznych w obecności strumienia gazu. Przepływomierze do cieczy bazujące na pomiarze termicznym nie są powszechnie znane, jedyny który można spotkać na rynku jest opisywany jako „pierwszy opracowany” [75]. Pokazuje to poziom trudności badawczych i konstrukcyjnych [75]. Proponowane rozwiązanie czujnika (PCP) jest dedykowane do urządzenia sanitarnego opracowanego w ramach projektu NCBiR, bazującego na nowatorskiej technologii<sup>2</sup> [153]. Innowacyjne podejście sprowadza się do maksymalnego uproszczenia konstrukcji mechanicznej przyrządu kosztem złożonego układu elektronicznego i pomiaru tylko jednego parametru, tj. stałej czasowej pojedynczego czujnika temperatury. Jest to zasada odrębna od wcześniej opisanej zasady działania masowych przepływomierzy termicznych. Innowacyjność jest również zaznaczona w warstwie informatycznej, tj. wykorzystanie grupy przepływomierzy jako systemu z obszaru Przemysłu 4.0 i IoT [93], [94], [95]. PCP jest przeznaczony do długookresowej pracy w środowisku wody twardej, a więc będzie on narażony na pokrycie warstwą osadu kamiennego. Analiza teoretyczna takiego zagadnienia jest zbliżona do analizy pracy termometru w osłonie, którego zachowanie jest znane i opisane teoretycznie [96]. W szczególności osad kamienny (osłona) wpływa na właściwości dynamiczne termometru, głównie stałą czasową układu „czujnik + osłona”. Tę właśnie zależność (rys. 3.2) wykorzystano do pomiaru grubości warstwy osadu kamiennego [97].

---

<sup>1</sup> Termin „stała czasowa” jest tu pewnym uproszczeniem, jednak dobrze oddaje istotę tego pomiaru. Szczegóły tych różnic zostaną wyjaśnione w dalszej części pracy.

<sup>2</sup> Wykonane urządzenie w ramach projektu NCBiR uzyskało złoty medal podczas Międzynarodowych Targów Wynalazków Kaohsiung International Invention and Design EXPO 2020 (KIDE) na Tajwanie oraz srebrny medal podczas Wystawy Wynalazków IIDC – International Invention and Design Competition 2020 w Hongkongu [150]

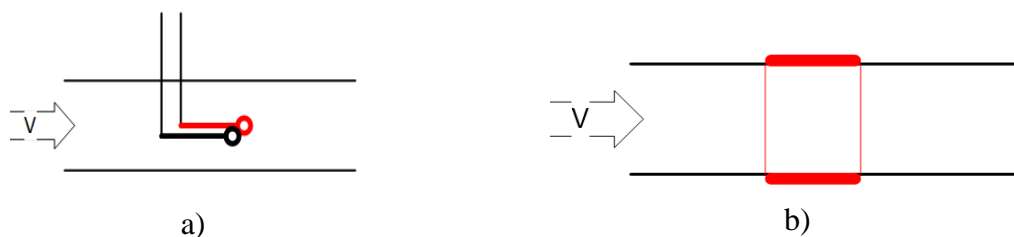


Rys. 3.2. Charakterystyka wpływu grubości osadu kamiennego na wartość stałej czasowej podczas nagrzewania i chłodzenia czujnika temperatury: 1) stała czasowa czujnika bez osadu kamiennego („czysty”), 2) różnica stałych czasowych czujnika bez osadu i z osadem kamiennym

Fig. 3.2. Characteristics of the effect of stone deposit thickness on the value of the time constant during heating and cooling of the temperature sensor: 1) time constant of sensor without scale deposit ("clean"), 2) difference of time constants of sensor without deposit and with scale deposit

Zakładając, że znana jest wartość stałej czasowej czujnika bez osadu („czystego”), to odstępstwa, przy odpowiedniej konstrukcji urządzenia, stałej czasowej od wartości nominalnej będą wynikały ze zmiany parametrów cieplnych wynikających z osadzającego się kamienia. Ta różnica wartości stałej czasowej nominalnej i stałej czasowej aktualnej może zostać wykorzystana do oszacowania/pomiaru grubości osadzonej warstwy przy założeniu, że strumień płynący przez kanał jest zerowy [98], [99], [100], [101], [102]. Takie opracowanie zostało wykonane i opatentowane [103], a Autor jest współtwórcą patentu na wynalazek.

Na rys. 3.3 porównanie schematu znanych konstrukcji termicznych przepływomierzy masowych (3.3a) i proponowanego rozwiązania umożliwiającego pracę z osadem kamiennym PCP – pierścieniowego czujnika przepływu (3.3b).

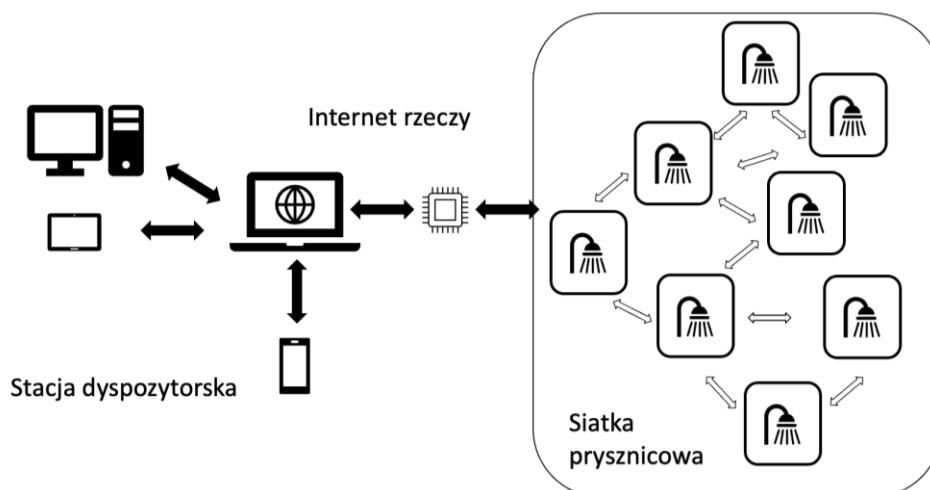


Rys. 3.3. Schemat konstrukcji termicznych przepływomierzy masowych: a) typowe rozwiązanie, b) rozwiązanie wyposażone w PCP - pierścieniowy czujnik przepływu

Fig. 3.3. Scheme of construction of thermal mass flow meters: a) typical solution, b) solution equipped with PCP - ring flow sensor

Znane konstrukcje termiczne wykorzystują dwa czujniki temperatury, które umiejscowione są w sposób mogący inicjować powstawanie osadu kamiennego (rys 3.3a). Proponowane rozwiązanie wyposażone jest w PCP, który jest elementem czynnym wykorzystującym specjalnej konstrukcji czujnik temperatury. Pomiar nie jest punktowy, a odbywa się na całej powierzchni pierścienia. PCP nie zaburza przepływu i umożliwia oszacowanie grubości osadu w kanale, co z kolei umożliwia wyznaczenie odpowiednich poprawek, a tym samym pomiar uwzględniający obecność osadu kamiennego. Zostało to dokładniej opisane w dalszej części pracy. Uzupełniając warto jeszcze wspomnieć o strukturze połączeń sieciowych którego częścią ma być prezentowany czujnik.

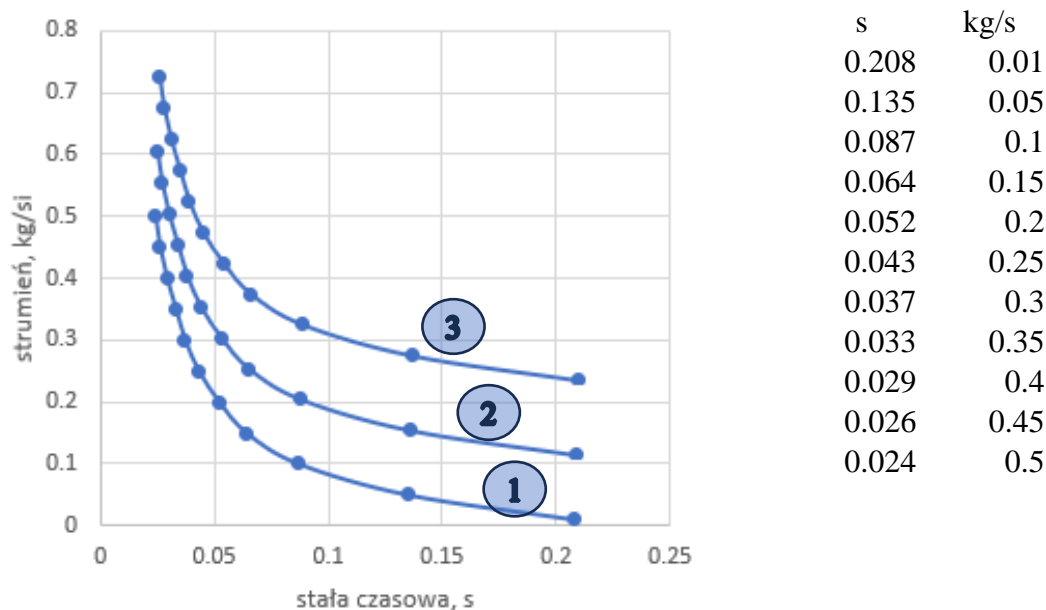
Na rysunku 3.4 przedstawiono przykładowy schemat sieci IoT wraz z siecią urządzeń wyposażonych w PCP.



Rys. 3.4. Schemat poglądowej sieci IoT z grupą urządzeń wyposażoną w PCP

Fig. 3.4. Scheme of an illustrative IoT network with a group of devices equipped with a PCP

Pokazano również przykład komunikacji w ramach Internetu rzeczy PCP zaimplementowanych w elementach końcowych instalacji hydraulicznych takich jak prysznice. Obrazuje to jak mógłby wyglądać system pomiarowy, gdzie prostota rozwiązania umożliwia stosowanie go w wielu miejscach i w czasie rzeczywistym uzyskiwać informację na temat zużycia wody. Istota pomiaru sprowadza się do rejestracji stałej czasowej chłodzenia PCP, która różni się w zależności od natężenia przepływu. Na rysunku 3.5 zaprezentowano przykład zależności strumienia masowego od stałej czasowej dla różnych grubości osadu kamiennego.



Rys. 3.5. Charakterystyka zależności strumienia masowego od stałej czasowej dla różnych grubości osadu kamiennego; (1) brak osadu kamiennego, (2), (3) z osadem kamiennym

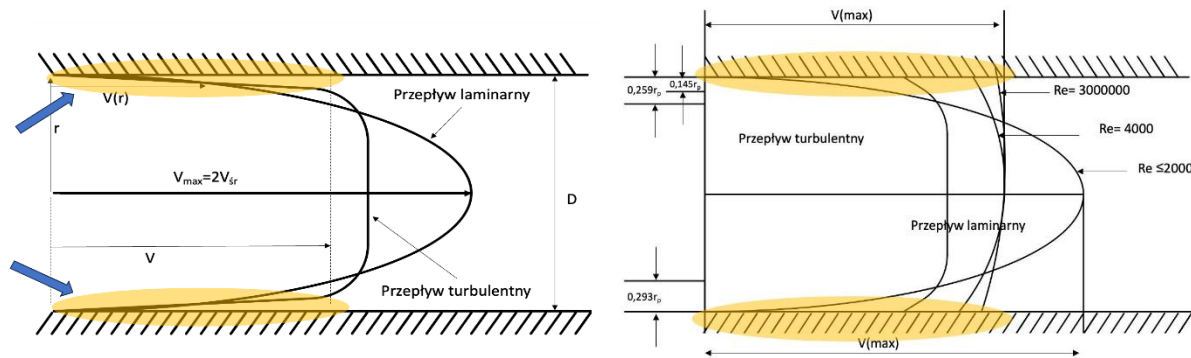
Fig. 3.5. Characteristics of mass flow dependence on time constant for different thicknesses of stone sludge: (1) no scale deposit, (2), (3) with scale deposit

Krzywa oznaczona jako (1) reprezentuje zależność strumienia i stałej czasowej w przypadku braku osadu kamiennego, z kolei (2) i (3) to kolejne krzywe uzyskiwane w obecności osadu. Zależność stałej czasowej od strumienia przepływu jest więc pozornie oczywista (rys. 3.5), jednakże bardziej szczegółowa analiza ujawnia większą złożoność procesu, co pokazano w dalszej części pracy.

### 3.2. Wybrane zagadnienia teorii mechaniki płynów

Jednym z kluczowych zagadnień, które należy tu rozpatrzyć jest rodzaj przepływu i profil prędkości. Rysunek 3.6 przedstawia rozkład prędkości dla przepływu laminarnego i turbulentnego w rurociągu o przekroju kołowym. Strzałkami zaznaczono obszar wpływu strugi

na PCP. Ze względu na to, że obszar ten jest położony w warstwie przyściennej, czujnik jest pierścieniem o średnicy rury, to należy się spodziewać charakterystyki pracy PCP jak dla przepływu laminarnego w znacznie szerszym zakresie liczb Reynoldsa niż to wynika z samej klasyfikacji rodzaju przepływu.



Rys. 3.6. Widok rozkładów prędkości w ruchu laminarnym i turbulentnym (strzałkami zaznaczono obszar oddziaływania PCP) [104], [105]

Fig. 3.6. View of velocity distributions in laminar and turbulent motion (the arrows indicate the area of influence of PCP)

Można powiedzieć, że w strefie oddziaływania na czujnik przepływ laminarny utrzymuje się w zakresie większych liczb  $Re$  niż  $Re$  krytyczne dla strugi.

### 3.2.1. Liczby kryterialne i błędy pomiarowe

Podstawowymi liczbami kryterialnymi, które analizowano były liczby Reynoldsa oraz Prandtla. Liczba Reynoldsa to bezwymiarowa wielkość stosowana w mechanice płynów do klasyfikacji przepływu. Liczba Reynoldsa w tym przypadku umożliwiła lepsze zrozumienie warunków pracy projektowanego czujnika. Rodzaj przepływu, laminarny lub turbulentny, może wpływać na dokładność i niezawodność przepływomierza. W przepływie turbulentnym zmianie ulega profil prędkości w stosunku do laminarnego. Niektóre metody pomiarowe, takie jak elektromagnetyczne lub ultradźwiękowe, mogą być wrażliwe na rodzaj przepływu.

Liczbę Reynoldsa definiuje się jako stosunek sił bezwładności do sił lepkości w płynie. Może być obliczana różnymi sposobami, w zależności od konkretnego przypadku. Liczba  $Re$  zdefiniowana jest na równaniu (3.1) dla kanałów okrągłych [106] :

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (3.1)$$

gdzie:

$v$  - prędkość płynu,  $m/s$

$d$  - wymiar charakterystyczny,  $m$

$\nu$  - kinematyczny współczynnik lepkości,  $m^2/s$

Liczba Reynoldsa ma kluczowe znaczenie w określeniu rodzaju przepływu płynu:

- Dla małych wartości  $Re$  ( $Re < 2100$ ) występuje przepływ laminarny, gdzie warstwy przemieszczają się równolegle, a przepływ jest uporządkowany i stabilny.
- Dla wartości średnich ( $2100 < Re < 3000$ ) występuje faza przejściowa między przepływem laminarnym, a turbulentnym, co nazywane jest obszarem przejściowym.
- Dla dużych wartości  $Re$  ( $Re > 3000$ ) występuje przepływ turbulentny, gdzie płyn porusza się chaotycznie, tworząc zawirowania [107], [108], [109].

W przeprowadzonych pomiarach eksperymentalnych nie odnotowano istotnych różnic dokładności pomiaru wraz ze wzrastającą liczbą Reynoldsa. Upraszcza to budowę algorytmów obliczeniowych przepływomierza, niemniej jednak wartość tej liczby należy kontrolować.

Liczba Prandtla jest szczególnie przydatna w obliczeniach przenikania ciepła, zwłaszcza w sytuacjach związanych z konwekcją naturalną lub wymuszoną, gdzie kluczowe znaczenie ma zrozumienie charakterystyki warstwy granicznej i szybkości przenikania ciepła.

W przypadku konwekcji wymuszonej (np. przepływu płynu wzdłuż ogrzewanej powierzchni) znajomość liczby Prandtla pomaga w przewidywaniu grubości warstwy granicznej i szybkości wymiany ciepła między płynem a powierzchnią stałą [110].

Liczba Prandtla, oznaczana jako  $Pr$ , to bezwymiarowy wskaźnik fizyczny stosowany w mechanice płynów, który charakteryzuje stosunek lepkości dynamicznej do przewodnictwa cieplnego w płynach. Dla płynów i gazów jest zdefiniowana równaniem (3.2):

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (3.2)$$

gdzie:

$\mu$  - lepkość dynamiczna płynu,  $Pa \cdot s$

$c_p$  - ciepło właściwe,  $J/kgK$

$k$  - przewodność cieplna,  $W/mK$



Wysokie wartości liczby Prandtla wskazują, że przewodnictwo cieplne jest bardziej efektywne niż transport pędu, co jest typowe dla gazów. Natomiast niskie wartości oznaczają, że przenoszenie pędu jest bardziej znaczące niż przewodnictwo cieplne, co ma miejsce w przypadku cieczy. Dla powietrza, wartość liczby Prandtla w przybliżeniu wynosi 0.71, podczas gdy dla wody wynosi około 7 i nie jest zależna od ciśnienia i temperatury.

Pomaga ona przewidywać i optymalizować procesy wymiany ciepła w różnych zastosowaniach, w tym w układach chłodzenia, przetwarzaniu chemicznym i zarządzaniu ciepłem w projektach inżynierskich. W proponowanym rozwiązaniu zasada działania przepływomierza opiera się na wyznaczeniu w określonych warunkach czasu chłodzenia. Kontrola liczby Prandtla umożliwia weryfikację charakteru wymiany ciepła oraz kontrolę zmian warunków przepływu. Oczekiwana jest wartość niezmienna tej liczby dla prowadzonych analiz.

Liczba Prandtla nie jest bezpośrednio wykorzystywana przy pomiarach przepływu lub urządzeniach takich jak przepływomierze, jednak odgrywa kluczową rolę w analizie wymiany ciepła w układach płynów obejmujących przepływ, takich jak:

- a) wymienniki ciepła - liczba Prandtla wykorzystywana jest w optymalizacji wymienników ciepła. Wpływa to na grubość termicznych warstw przyściennych i wpływa na ogólną efektywność procesu wymiany ciepła.
- b) konwekcyjne przenoszenie ciepła - w sytuacjach przepływu, w których przenoszenie ciepła w wyniku ruchu płynu (konwekcja) jest znaczące, liczba Prandtla jest istotna, ponieważ reguluje stosunek dyfuzji pędu do dyfuzji termicznej, wpływając na szybkość wymiany ciepła.

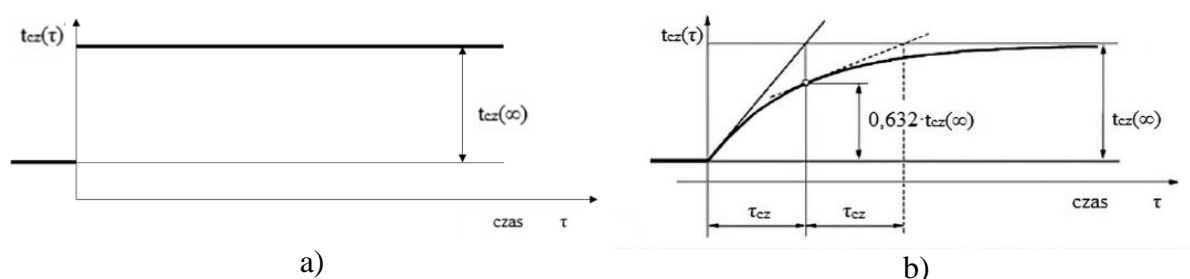
Podczas gdy urządzenia do pomiaru przepływu (przepływomierze), opierają się głównie na parametrach (natężenie przepływu, prędkość, różnice ciśnień) oraz właściwościach płynu (lepkość i gęstość), liczba Prandtla zapewnia kluczowy wgląd w zachowania wymiany ciepła w tych układach płynów, w których przeprowadza się pomiar przepływu. Pomaga optymalizować współczynniki wymiany ciepła oraz charakterystykę cieplną w tych systemach, pośrednio wpływając na ogólną wydajność i efektywność procesu pomiaru przepływu [111], [112], [113], [114].

### 3.2.2. Definicja stałej czasowej

Stała czasowa to parametr opisujący prędkość z jaką zmienia się odpowiedź systemu w zależności od zmiany sygnału wejściowego lub zakłócenia. Jest to miara tego, jak szybko system osiąga nowy stan ustalony po wystąpieniu zmiany lub zakłócenia. Stała czasowa służy do charakteryzowania zachowania systemów, szczególnie tych, które obejmują reakcje dynamiczne lub stany nieustalone [115], [116], [117], [118].

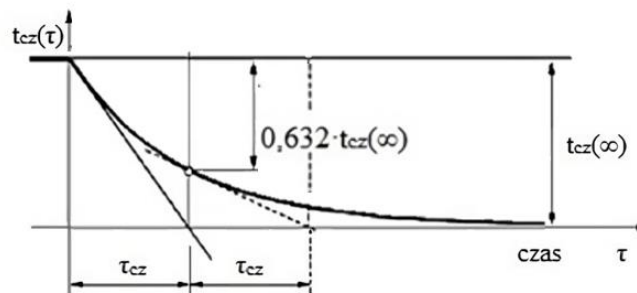
W wymianie ciepła stała czasowa odnosi się do czasu potrzebnego systemowi na osiągnięcie nowej równowagi temperaturowej po zewnętrznej zmianie temperatury. Stała czasowa ma kluczowe znaczenie przy opisywaniu czasu reakcji systemu na zmiany parametrów [115], [119], [120].

Stała czasowa zgodnie ze znaną definicją charakteryzuje czas, po którym temperatura czujnika (czyli temperatura wskazywana) osiągnie 0.632 wartości temperatury ośrodka po jej skokowej zmianie (rys. 3.7a i 3.7b). Można ją wyznaczyć jako styczną do charakterystyki w dowolnym jej punkcie [121], [122], [123], [124], [125].



Rys. 3.7. Charakterystyka dynamiczna czujnika temperatury: a) przebieg czasowy temperatury mierzonej, b) przebieg temperatury wskazywanej przez czujnik rezystancyjny ( $t_{cz}$  – temperatura czujnika)

Fig. 3.7. Dynamic characteristics of the temperature sensor: a) the time course of the measured temperature, b) the course of the temperature indicated by the resistive sensor ( $t_{cz}$  - temperature of the sensor)



Rys. 3.8. Charakterystyka stałej czasowej w przypadku przebiegu czasowym temperatury malejącej

Fig. 3.8. Characteristics of the time constant in the case of a decreasing temperature time course

Termin „stała czasowa czujnika” jest jednakże w przypadku tej pracy uproszczeniem. Należy zauważyć, że warunki definicyjne pomiaru stałej czasowej oraz warunki pomiaru występujące w rozpatrywanym przyrządzie nie są identyczne, a tylko zbliżone do siebie. Główna różnica wynika z oddziaływania mierzonego strumienia jak i samej metodyki pomiaru. Istota tych różnic zostanie wyjaśniona w dalszej części pracy.

### **3.3. Dwukrokowy pomiar strumienia przepływu w kanale zakamienionym**

Istnieje graniczna grubość warstwy osadu kamiennego, dla której pomiar będzie wyłącznie wskaźnikowy. Ponieważ jednak proponowana w dalszej części pracy konstrukcja PCP nie zaburza przekroju poprzecznego kanału przepływowego (nie wystaje do wnętrza kanału żaden element) to grubość osadu kamiennego w miejscu pomiaru powinna być zbliżona lub identyczna jak w pozostałej części rurociągu. Zakłada się również, że jedyną wartością którą jest mierzona jest stała czasowa chłodzenia czujnika temperatury. Niestety zarówno osad kamienny jak i zmiana wartości strumienia wody będą jednocześnie wpływały na ten sam zmierzony parametr, czyli stałą czasową. Nie będzie można więc odróżnić tych dwóch wpływów. Logiczny więc wydaje się wniosek, że w jednym kroku pomiarowym nie będzie możliwości tego rozwiązania bez rozbudowy przepływomierza o pomiar kolejnego parametru, analogicznie do sytuacji, gdy są dwie niewiadome, a jedno równanie. Jedynym widocznym rozwiązaniem tego problemu jest dodatkowy pomiar przy znanym jednym z dwóch parametrów. Takim pomiarem może być pomiar stałej czasowej przy znanej wartości przepływu. Z kolei jedyną wartością przepływu, którą można ewentualnie znać, jest przepływ zerowy czyli brak przepływu. Wynika stąd wniosek, że przepływomierz powinien działać dwukrokowo:

- 1) pomiar stałej czasowej do wyznaczenia grubości osadu kamiennego przy braku przepływu,
- 2) pomiar stałej czasowej do wyznaczenia wartości strumienia przy uwzględnieniu informacji o grubości warstwy osadu kamiennego.

Pierwszy z pomiarów nie musi się odbywać przed każdym pomiarem przepływu. Grubość osadu kamiennego będzie zbliżona w długich okresach czasu, stąd pomiar w cyklach tygodniowych albo nawet miesięcznych będzie wystarczający. Zapamiętana wartość ostatniego wyznaczania grubości osadu będzie parametrem do korekty odczytu wartości strumienia realizowanego w drugim kroku.

### **3.4. Podsumowanie założeń wstępnych**

- a. Koncepcja pomiaru zakłada, że dowolne urządzenie pomiarowe zawierające elementy ruchome nie sprawdzi się w przyjętych założeniach.
- b. Głównym utrudnieniem jest kryterium, że wymagana jest odporność urządzenia na długookresową eksploatację w warunkach wody twardej. W założeniu PCP nie będzie urządzeniem służącym do rozliczeń, a raczej głównie do wskaźnikowego określania poziomu zużycia wody w każdym możliwym punkcie jej poboru. Tego typu pomiar umożliwi racjonalną gospodarkę zużyciem wody z wszystkimi tego skutkami (oszczędności, wykrywanie wycieków, wskazywanie punktów o nadmiernym zużyciu, etc.).
- c. Konstrukcja przepływomierza (wskaźnika przepływu) musi być prosta i łatwa do wykonania w warunkach niezbyt zaawansowanego technologicznie zaplecza warsztatowego.
- d. Rozwiązanie musi się cechować najwyższą możliwą niezawodnością i pewnością działania, musi też spełniać warunki dotyczące Przemysłu 4.0, jak również Internetu rzeczy. Analizując dostępne rozwiązania, które kolejno były odrzucane, skierowano uwagę na metody termiczne. Metody termiczne jako takie, nie zawierają żadnych elementów ruchomych podatnych na uszkodzenia z powodu zakamienienia. Są jednocześnie znane i dostępne np. do pomiaru prędkości przepływu powietrza (termoanemometry). Idea ich działania polega na zależności prędkości przepływu powietrza od intensywności chłodzenia czujnika nagrzewanego prądem elektrycznym. Metody te nie nadają się bezpośrednio do użycia w analizowanym przypadku, niemniej jednak ten rodzaj rozwiązań wydaje się właściwy dla przyjętych założeń. Wcześniej opracowany model pomiaru grubości osadu kamiennego zawierał założenie, że strumień płynący przez rurociąg jest zerowy. Warto zauważyć, że jeżeli zrezygnuje się z tego założenia to pomiar stałej czasowej czujnika temperatury nie będzie miarodajny, gdyż zależec będzie od grubości osadu kamiennego, ale również prędkości przepływającej wody. Im większa prędkość tym lepsza dynamika wymiany ciepła i szybsze dochodzenie termometru do stanu ustalonego. Jednakże gdyby założyć, że znana jest grubość warstwy osadu, to wówczas stała czasowa będzie zależec głównie od prędkości przepływu oraz ewentualnych korekt związanych z poziomem temperatury czy ciśnienia. Wpływ tych poprawek należy oczywiście oszacować i w przypadku wpływu nieistotnego można zrezygnować z ich rozpatrywania. Podsumowując, koncepcja pomiaru przepływu sprowadza się do dwukrotnego, pomiaru

stałej czasowej układu „czujnik temperatury + osad + strumień przepływającej wody”. Pierwszy raz pomiar jest wykonywany dla oszacowania aktualnej grubości warstwy osadu kamiennego, a drugi raz do wyznaczenia prędkości przepływającej cieczy. Warto również zauważyć, że tym samym elementem czynnym można jednocześnie mierzyć temperaturę i przepływ oraz jeżeli zastosowany zostanie czujnik rezystancyjny metalowy, nagrzewać sam czujnik pomiarowy, poprzez wymuszenie odpowiedniego przepływu prądu. Jest to o tyle ważne, że pozwala na użycie minimalnej ilości elementów konstrukcyjnych w samym urządzeniu, a jednocześnie zapewnia realizację wszystkich funkcji.

## **4. Metodyka badawcza i zakres wykonanych prac**

### **4.1. Wybór narzędzi badawczych**

Jako narzędzia badawcze wykorzystano modelowanie numeryczne CFD w środowisku Ansys-CFX, modelowanie fizyczne z wykorzystaniem środowiska Matlab-Simscape oraz badania eksperymentalne na stanowisku laboratoryjnym. Wybór ten był podyktowany przesłankami związanymi z przydatnością poszczególnych narzędzi badawczych do szerokich badań parametrycznych. Wstępne analizy dotyczące istoty działania jak i wstępnej oceny parametrycznej wykonano w systemie Ansys-CFX. Było to związane z koniecznością potwierdzenia słuszności przyjętej koncepcji działania przyrządu oraz określenia wstępnych wartości parametrów, np. wstępnego określenia jakiego rzędu wielkości są uzyskiwane stałe czasowe, jakiej wartości masy czujników należy przyjmować, etc. Badania numeryczne posłużyły również do określenia wpływu zaburzeń profili prędkości na wynik pomiaru i innych danych szczegółowych. Ta metoda badawcza nie nadaje się do masowych obliczeń z wykorzystaniem szerokiego zakresu zmienności parametrów ze względu na nieakceptowalnie długi czas obliczeń tak wielu przypadków. Należy zwrócić uwagę, że każdy cykl obliczeniowy w systemie modelowania numerycznego musi być w tym przypadku rozpoczynany od danych inicjujących. Wynika to z faktu, że rezultatem obliczeń jest czas, a ten parametr nie może zależeć od wartości obliczeń dla innych warunków przepływu. Ta sytuacja zdecydowanie wydłuża niezbędne nakłady czasowe na obliczenia.

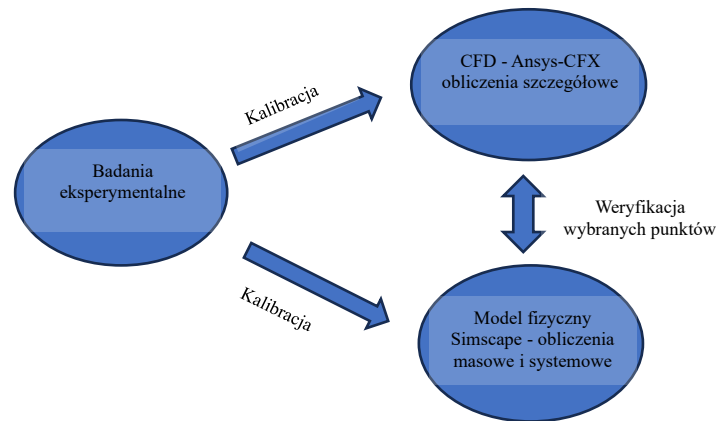
### **4.2. Przyjęta strategia badań**

W przypadku opracowywania interdyscyplinarnego rozwiązania jakim jest proponowana konstrukcja przepływomierza, ważna jest przyjęta strategia i kolejność kroków badawczych. Przyjęto następującą kolejność prac:

- 1) budowa stanowiska eksperymentalnego i pomiary wstępne,
- 2) budowa modelu numerycznego Ansys CFX i kalibracja modelu,
- 3) budowa modelu Simscape do modelowania fizycznego i kalibracja modelu,
- 4) analizy numeryczne potwierdzające lub wykluczające przyjęte założenia, a w szczególności czy możliwe są pomiary stałej czasowej dla wyższych liczb Reynoldsa, w zakresach przepływu burzliwego, gdzie występuje duże nachylenie charakterystyki czasowej

- 5) modelowanie systemem Simscape, tabelaryzacja parametrów do implementacji w oprogramowaniu samego przepływomierza,
- 6) konstrukcja przepływomierza i opracowanie wstępnej dokumentacji wersji prototypowej.

Stanowisko laboratoryjne i badania eksperymentalne wykorzystano do kalibracji modeli CFD oraz kalibracji modelu fizycznego. Niedogodność w tym przypadku polegała na tym, że dostępna aparatura laboratoryjna nie umożliwiała wykonywania pomiarów małych wartości stałej czasowej. Przyjęto więc pewne uproszczenie polegające na tym, że kalibracja modeli odbyła się w zakresach parametrów, które można było rejestrować. Po zestrojeniu modeli w tych zakresach przyjmowano, że model działa poprawnie także w innych zakresach, tych docelowych. Jest to pewne uproszczenie, ale z jakościowego punktu widzenia całkowicie poprawne. Ilustracja zależności poszczególnych metod pokazana jest na rysunku 4.1



Rys. 4.1. Zależność funkcjonalna stosowanych narzędzi badawczych

Fig. 4.1. Functional dependence of the research tools used

Przed rozpoczęciem badań właściwych wykonano analizę obecnych rozwiązań przepływomierzy, ograniczeń technologicznych dla implementacji ich w zastosowanym w niniejszej pracy zakresie oraz stosowanych przyrządów pomiarowych. Analiza obejmowała istniejące rozwiązania techniczne oraz studium literatury.

### **4.3. Szczegółowy zakres prac**

- 1) Przeprowadzono analizę literaturową dotyczącą modelowania narastania osadu kamiennego z uwzględnieniem jego własności cieplnych, mechanizmów osadzania, sposobów modelowania matematycznego, jak również długookresowego oddziaływania na istniejące metody i urządzenia do pomiaru strumienia w instalacjach wodociągowych.

- 2) Zbudowano stanowisko laboratoryjne do pomiarów eksperymentalnych. Wykonano badania eksperymentalne z wykorzystaniem warstwy gipsu oraz zebranego kamienia z czajnika elektrycznego. Wyzwaniem było przytwierdzenie odpowiedniej ilości „osadu kamiennego” do wewnętrznej strony rury. W tym celu wykorzystano klej szybkoschnący, jednak w tym przypadku uzyskano powierzchnię zbyt gładką, a zmiana przekroju rury była znikoma. Stąd wyniki tych pomiarów odrzucono. Do badań ostatecznie wybrano zmatowioną wcześniej taśmę samoprzylepną, symulującą kolejne warstwy osadu [126], [127], [128], [129], [130], [131].
- 3) Przeanalizowano dostępne narzędzia do modelowania matematycznego i wybrano środowiska do modelowania fizycznego MatLab-Simscape oraz Ansys–CFX. Przyjęto oryginalną metodę pośredniej weryfikacji i walidacji modelu MatLab-Simscape z modelem numerycznym uruchomionym w środowisku Ansys-CFX.
- 4) Zaprojektowano i wykonano autorski model obliczeniowy (MatLab-Simscape) grubości osadu kamiennego zgodnie z opracowaną koncepcją oraz oprogramowanie sterujące tym modelem, wykonano weryfikację stosując model numeryczny (Ansys-CFX).
- 5) Opracowano współautorskie zgłoszenie patentowe pt. Sposób wykrywania wewnętrznego osadu kamiennego w układach hydraulicznych oraz urządzenie do realizacji tego sposobu [103].
- 6) Opracowano koncepcję pomiaru strumienia wody z wykorzystaniem wcześniej uzyskanego rozwiązania patentowego dotyczącego pomiaru grubości osadu kamiennego.
- 7) Opracowano autorski model obliczeniowy (MatLab-Simscape) pomiaru przepływu wraz z implementacją pomiaru grubości kamienia. Uzupełniono oryginalne procedury Simscape o obliczenia liczby Reynoldsa i Prandtla. Założono, że wartości tych dwóch liczb kryterialnych mogą mieć znaczenie dla wymiany ciepła pomiędzy czujnikiem, a przepływającym strumieniem wody.
- 8) Wykonano oprogramowanie sterujące modelem oraz przeprowadzono masowe obliczenia parametryczne. Zastosowano metodę obliczeniową ze stałym krokiem zmiany

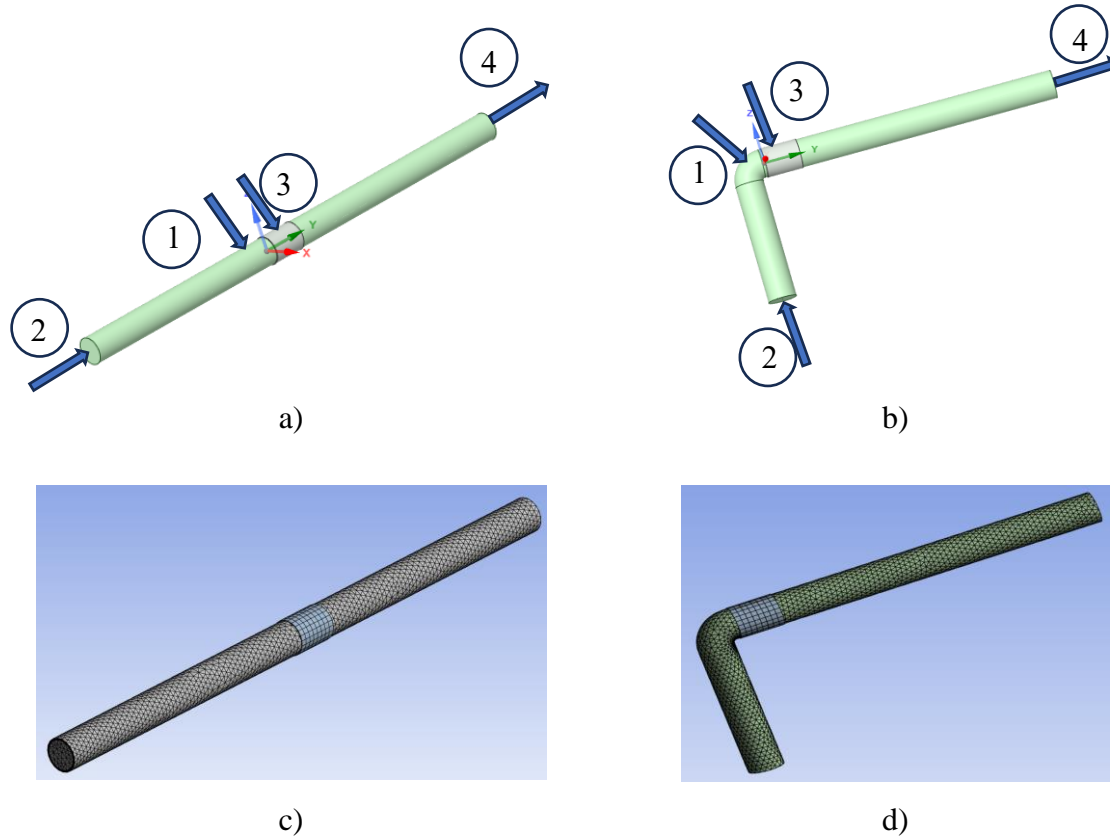


poszczególnych parametrów, co pozwoliło na uzyskanie pełnego i wiarygodnego obrazu pracy modelu.

- 9) Wykonano w systemie MatLab-Simscape autorskie oprogramowanie do pomiaru przepływu w rzeczywistym urządzeniu (odpowiednik oprogramowania instalowanego w fizycznym urządzeniu) wraz z analizą błędów pomiarowych wynikających z uproszczeń i „niedoskonałości” przyjętych algorytmów. Idea badań tych błędów polegała na porównaniu zadanego z góry przepływu z wartością wskazaną przez model matematyczny bazujący na pomiarze stałej czasowej i wyznaczeniu na tej podstawie przepływu.
- 10) Uwzględniając wyniki modelowania przyjęto konstrukcję fizyczną przepływomierza pokazaną na rysunkach w dalszej części pracy.
- 11) Wytworzono uproszczony prototyp eksperymentalnego przepływomierza i wykonano wstępne badania laboratoryjne potwierdzające przyjętą koncepcję i rozwiązanie.

## 5. Model numeryczny przepływomierza

Model numeryczny przepływomierza wykonano w środowisku Ansys-CFX. Widok domen obliczeniowych modeli numerycznych przedstawiono na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Widok domen obliczeniowych: a) wersja prosta, b) wersja do analizy wpływu miejsca montażu, c) siatka obliczeniowa dla wersji prostej, d) siatka obliczeniowa dla wersji do analizy wpływu miejsca montażu

Fig. 5.1 View of calculation domains: a) straight version, b) place impact version, c) calculation grid for straight version, d) calculation grid for place impact version

Pierwsza domena składa się ze smukłego kanału o przekroju kołowym (1) reprezentującego wodę w rurociągu prostym (rys 5.1a). Zdefiniowano wlot (2) i wylot (3) kanału. Na tej domenie posadowiony jest pierścień pomiarowy (4). Pomiędzy pierścieniem pomiarowym (4), a domeną (1) zdefiniowano interfejs jako rezystancję cieplną wyrażoną w jednostkach K/W. Wartość tej rezystancji jest sumą składowej stałej, wynikającej z konstrukcji urządzenia oraz składowej zmiennej wynikającej z oporu cieplnego warstwy osadu kamiennego. Zakłada się pomijalnie mały wpływ bezwładności cieplnej samego osadu kamiennego. Zewnętrzna strona pierścienia pomiarowego oraz pozostała część domeny (1) są zadeklarowane jako ścianki adiabatyczne. Dla domeny zakrzywionej (rys. b) pozycja

pierścienia pomiarowego względem kolana zmieniającego kierunek przepływu cieczy, jest sparametryzowana. Pozwala to na badanie wpływu odległości pierścienia pomiarowego od kolanka na wynik pomiaru.

Dla zamodelowania powierzchni chropowatej osadu wapiennego przeanalizowano również wpływ dostępnych w CFX modeli chropowatości powierzchni wewnętrznej kanału przepływowego. Nie stwierdzono istotnych różnic w wynikach, dlatego przyjęto stały model chropowatości „Sand Grain Roughness” = 0.5 mm.

## **5.1. Badanie wpływu rozmiaru siatki obliczeniowej**

Dobór parametrów siatki obliczeniowej, szczególnie w warunkach analiz niestacjonarnych jest istotnym elementem wpływającym na poprawność wyniku. W przypadku modelu takiego jak proponowany może to jednak mieć mniejsze znaczenie. Nie rozpatruje się tu szczegółowych parametrów termodynamicznych w poszczególnych węzłach siatki, a jedynie osiągnięcie lub nie wartości granicznej związanej z uśrednioną temperaturą w całej objętości pierścienia pomiarowego. Wydaje się więc, że w takiej sytuacji parametry samej siatki obliczeniowej mają mniejszy wpływ na wynik obliczeń. Do analiz przygotowano kilka siatek, a otrzymane rezultaty zebrano w tabeli 5.1

Tab. 5.1. Rezultaty dla przygotowanych siatek

Tab. 5.1. Results for prepared meshes

Siatka	Statystyka	Zmierzony parametr
	Węzłów/elementów	
A	43256/96564	0.096
B	90906/204577	0.103
C	184720/427376	0.107
D	317942/742766	0.111
E	17632/37256	0.125
F	28413/61599	0.101
G	61269/135795	0.1



Rys. 5.2. Charakterystyki wpływu wielkości siatki obliczeniowej na wynik pomiaru

Fig. 5.2. Characteristics of the effect of grid size on the measurement result

Do wygenerowania siatki na potrzeby modelu numerycznego zastosowano metodę Multi Zone w połączeniu z funkcją Inflation, aby dokładnie analizować zjawiska w warstwie przyściennej. Metoda Multi Zone w miejscach, gdzie to możliwe automatycznie generuje siatkę ustrukturyzowaną składającą się z elementów sześciokątnych, natomiast regiony o skomplikowanej geometrii automatycznie wypełnia siatką nie ustrukturyzowaną. Główną zaletą wykorzystania tej metody jest precyzyjna kontrola gęstości siatki oraz dokładna reprezentacja warstwy granicznej co jest kluczowe w analizach przepływowych.

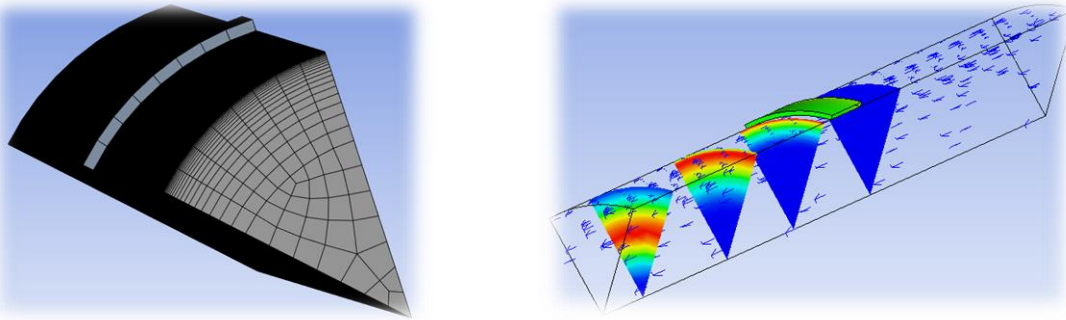
Porównując wyniki otrzymane dla różnych siatek obliczeniowych wybrano siatkę nr 4 jako najbardziej optymalną ze względu na szybkość i uśredniony względem innych wynik. W wyniku przeprowadzonych analiz do dalszych obliczeń wybrano siatkę G. Dla wybranej siatki G (tab. 5.1) obliczeniowej przebadano wpływ modelu turbulencji.

Tab. 5.2. Rezultaty analizy wpływu wybranego modelu turbulencji

Tab. 5.2. Results of the analysis of the impact of the selected turbulence model

Nazwa modelu turbulencji	Wynik symulacji dla wybranych parametrów
SST	0.1
BSL	0.99

W obliczeniach przyjęto model turbulencji SST jako najbardziej uniwersalny, łączący zalety modelu  $k-\varepsilon$  i  $k-\omega$ . W systemie Ansys-CFX jest również dostępny model BSL stosowany często do przepływów przyściennych. Dla wybranych przypadków różnice otrzymywanych wyników były pomijalne (tab. 5.2). Ostatecznie dla zmniejszenia nakładu czasowego został do obliczeń przyjęty wycinek kanału o kącie pomiędzy promieniami równym  $45^\circ$  (rys. 5.3).

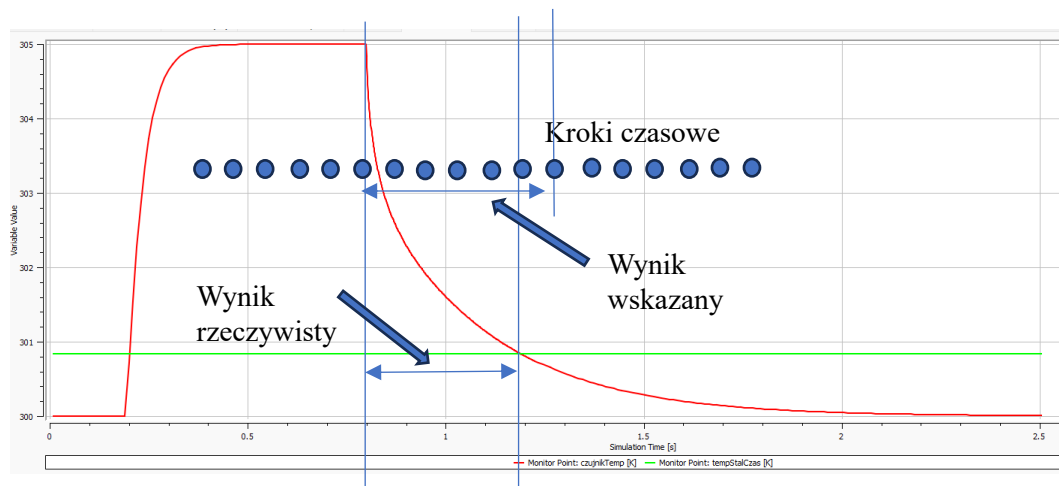


Rys. 5.3. Widok przyjętego do obliczeń wycinka kanału o kącie 45°

Fig. 5.3. View of the 45° channel slice adopted for the calculation

## 5.2. Dobór kroku czasowego

W przypadku badanego modelu dobór kroku czasowego jest kluczowy ze względu na dokładność otrzymywanego wyniku i bezpośrednio wpływa na uzyskiwaną rozdzielczość. Jest to trudny do rozwiązania niedostatek systemu modelowania. Niedostatek polega na braku możliwości w miarę prostego całkowania jakiegokolwiek wartości wynikowej pomiędzy krokami czasowymi. W tym konkretnym przypadku jest to parametr temperatury. Widać go tylko w kolejnych punktach regulowanych przyjętą wartością kroku czasowego. Nie wiadomo jak wartość temperatury się zmienia pomiędzy krokami czasowymi i nie można interpolować jej aby wyznaczyć punkt przecięcia z linią określającą przyjętą część wartości ustalonej (zielona linia rys. 5.4). Istotę tego problemu pokazano na rysunku 5.4.



Rys. 5.4. Analiza wpływu kroku czasowego na wynik obliczeń

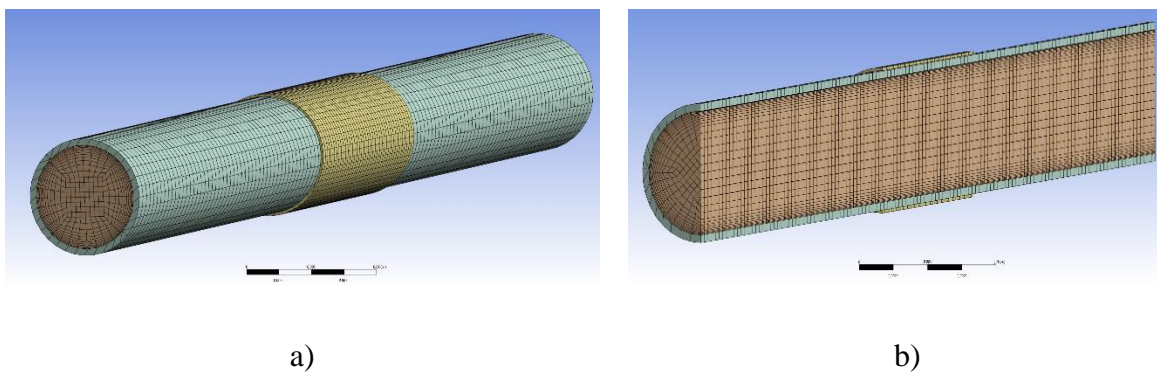
Fig. 5.4. Analysis of the impact of the time step on the calculation result

Wstępnie można założyć, że rozdzielczość powinna być taka, iż minimalna zmierzona wartość wskazana jest z błędem co najwyżej jednoprocetowym. To oznacza, że docelowo krok

czasowy powinien być o dwa rzędy mniejszy od minimalnej wartości stałej czasowej. Ostatecznie przyjęto krok zmienny, w strefie pomiaru czasu 0.001 s, poza strefą 0.01 s. Na tym etapie badań taka rozdzielczość wydaje się racjonalna jako kompromis pomiędzy czasem obliczeń, a rozdzielczością otrzymywanego wyniku.

### 5.3. Modelowanie systemu pomiaru przepływu

Analizowany model pokazano na rysunku 5.5. Na wlocie kanału założono stały przepływ masowy wody o przyjętej temperaturze. Na wylocie przyjęto ciśnienie otoczenia oraz założono model adiabatyczny. Ostatnim warunkiem brzegowym było zdefiniowanie źródła ciepła w miejscu grzałki. W tym przypadku założono generację ciepła równą  $2.5 \cdot 10^7 \text{ W/m}^3$ . Dla monitorowania zmian temperatury płynu zastosowano opcję próbkowania temperatury.



Rys. 5.5. a) Widok siatki modelu obliczeniowego w programie Ansys CFX, b) Widok siatki w przekroju modelu obliczeniowego w programie Ansys CFX

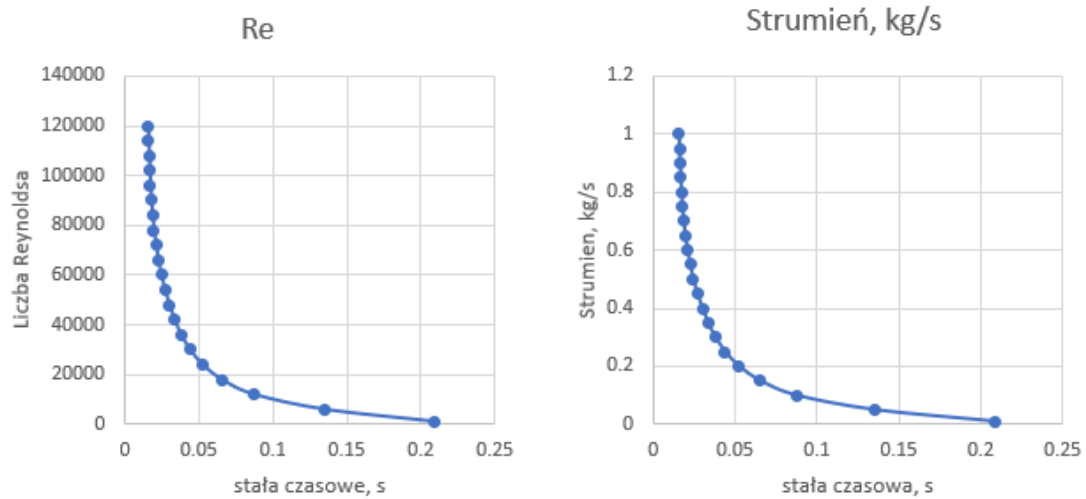
Fig. 5.5. a) View of the mesh of the computational model in Ansys CFX, b) View of the mesh in section of the computational model in Ansys CFX

W tabeli 5.3 przedstawiono uzyskane w wyniku modelowania wartości liczby Reynoldsa, strumieni przepływów i stałych czasowych dla wybranych punktów obliczeniowych, a na rysunku 5.6 przedstawiono to w formie graficznej. Uzyskane wartości obliczeniowe są spodziewane – w zakresie przepływu laminarnego stałe czasowe są znacznej wartości, a ich przyrost jest prawie liniowy, natomiast odwrotnie proporcjonalnie, zmienia się z wartością strumienia. W zakresie przepływu burzliwego krzywa jest mocno nachylona i dokładny pomiar strumienia będzie silnie zależał od dokładności pomiaru czasu.

Tab. 5.3. Wyniki obliczeń: Liczba Re, strumień i stała czasowa dla wybranych punktów obliczeniowych

Tab. 5.3. Calculation results: Re number, flux and time constant for selected calculation points

Stała czasowa	Strumień przepływu	Liczba Reynoldsa
s	kg/s	Re
0.209	0.01	1200
0.1355	0.05	6000
0.0875	0.1	12008
0.0655	0.15	18012
0.0525	0.2	24015
0.044	0.25	30019
0.038	0.3	36023
0.0335	0.35	42027
0.03	0.4	48031
0.027	0.45	54035
0.0245	0.5	60039
0.0225	0.55	66042
0.021	0.6	72046
0.0196	0.65	78000
0.0186	0.7	84050
0.0178	0.75	90058
0.0172	0.8	96062
0.0168	0.85	102400
0.0164	0.9	108070
0.016	0.95	114070
0.0158	1	120008



Rys. 5.6. Charakterystyki zależności liczby Reynoldsa i strumienia od stałej czasowej

Fig. 5.6. Dependence of the Reynolds number and flux on the time constant

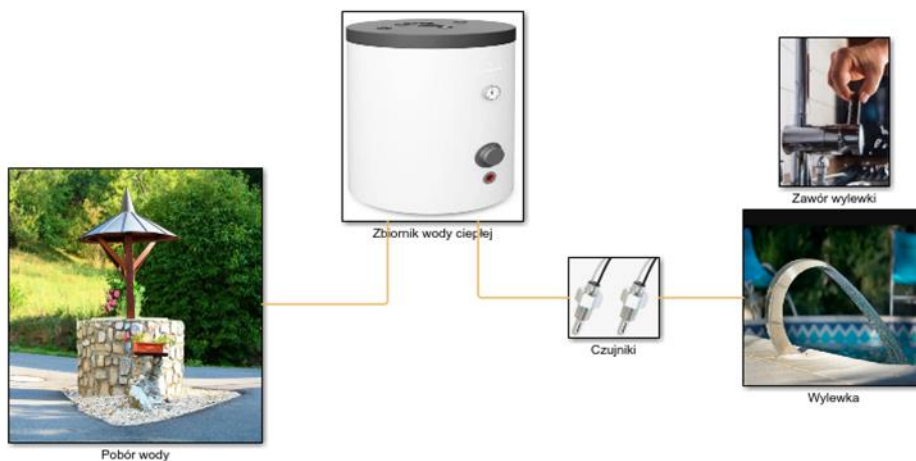
Zależność liczby Reynoldsa i strumienia od stałej czasowej pozornie jest oczywista, jednak jak można zauważyć na wykresie, obszar przepływu burzliwego występuje przy wyższej  $Re$ , aniżeli wskazuje na to literatura. W opinii Autora spowodowane jest to występowaniem przepływu laminarnego w warstwie przyściennej, w której odbywa się pomiar, dużo dłużej niż w środku kanału, w którym jest to już przepływ turbulentny.



## 6. Fizyczny model Simscape w środowisku MatLab

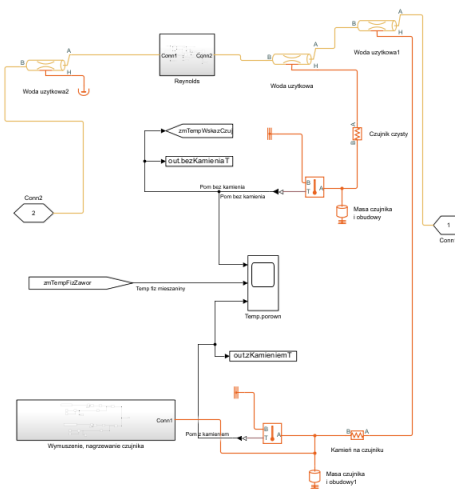
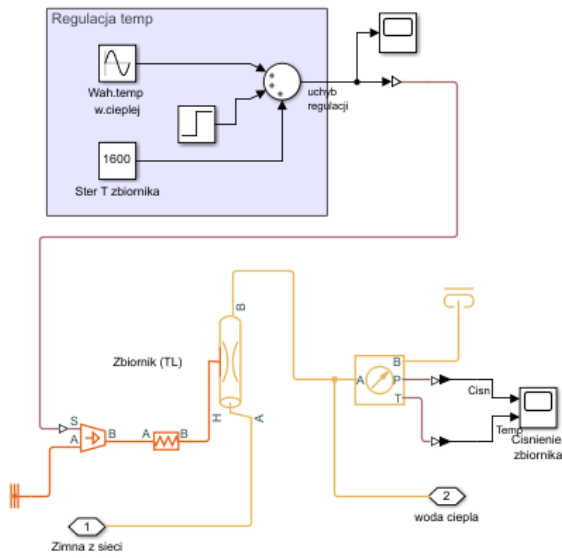
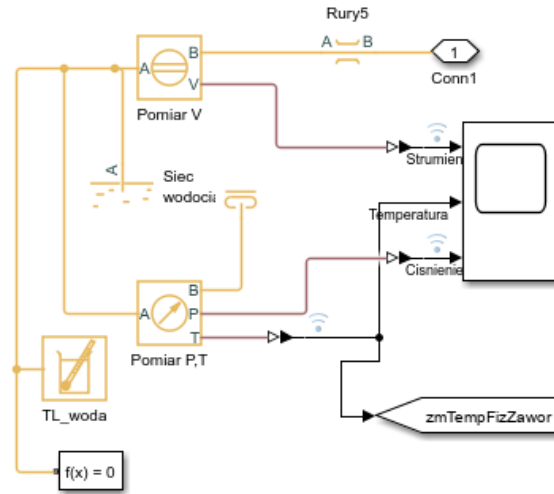
### *Budowa modelu*

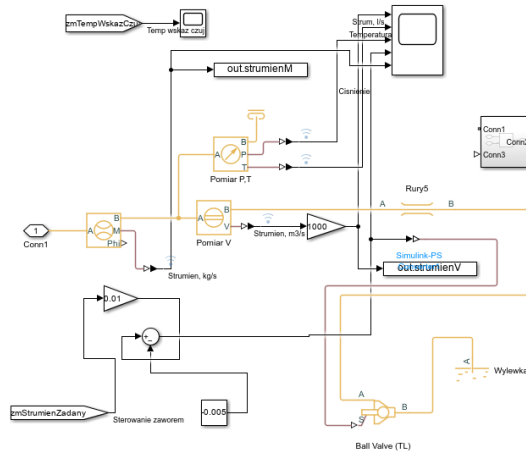
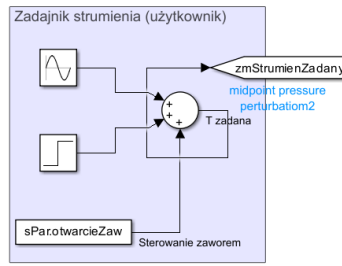
Biblioteka Simscape w systemie Matlab-Simulink jest narzędziem do modelowania sieci fizycznych. Pozwala ona na konstruowanie modeli bezpośrednio odwzorowując strukturę fizyczną układu oraz na łączenie komponentów mechanicznych, hydraulicznych, elektrycznych i termodynamicznych w jednym modelu. Z tego względu bardzo dobrze nadaje się do modelowania układów automatyki, pomiarowych, sterowania, etc., w pełni też obejmuje rozpatrywany przypadek. Ponieważ modelowanie dużej liczby cykli obliczeniowych w systemie Ansys-CFX wymaga sporych nakładów czasowych przyjęto koncepcję przeskalowania modelu w systemie Simscape wybranymi wynikami z modelu CFX, a następnie prowadzenie masowych obliczeń w systemie MatLab-Simscape. Na rysunku 6.1 przedstawiono podstawowy schemat blokowy modelu zaimplementowanego w środowisku MatLab. Główne elementy składowe modelu przedstawiono na rysunku 6.2.



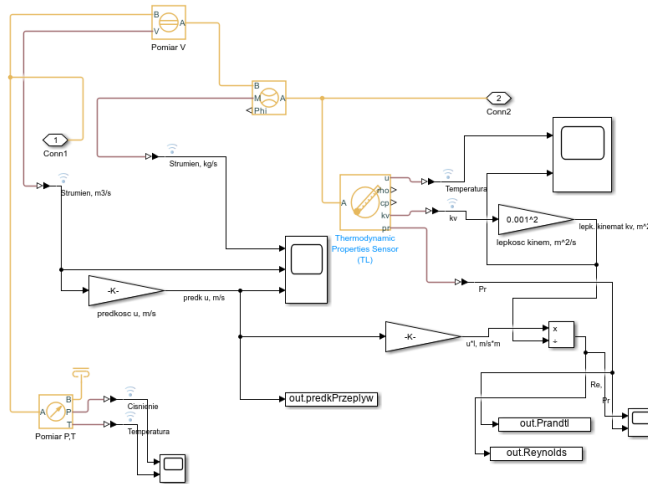
Rys. 6.1. Schemat poglądowy modelu zawierającego system pomiaru przepływu odporny na środowisko wody twardej

Fig. 6.1. Scheme of a model containing a flow measurement system resistant to a hard water environment

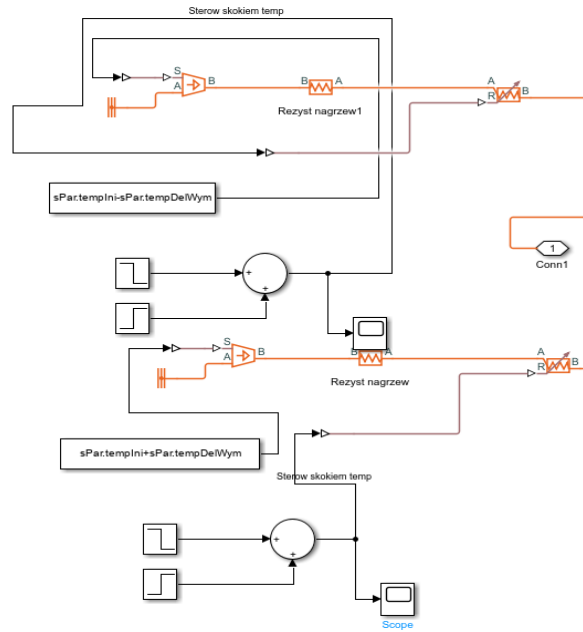




Modelowanie  
liczby  
Reynoldsa i  
Prandtla  
(modyfikacja  
bibliotek)



Modelowanie  
wymuszenie  
nagrzewania  
czujnika

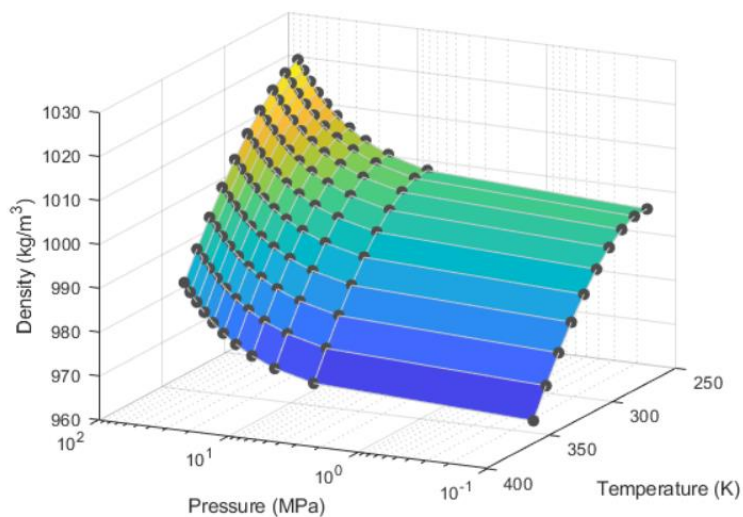


Rys. 6.2. Widok głównych elementów składowych modelu

Fig. 6.2. View of the main components of the model

Na rysunku 6.2 przedstawiono główne elementy składowe modelu. Przygotowane zostały modele poboru wody z sieci wodociągowej, gdzie między innymi zadano parametry fizyczne wody mające istotny wpływ na działanie systemu pomiaru przepływu. Na rysunku przedstawiono również przykładowy model zarządzania temperaturą wody.

Model wykorzystuje właściwości fizyczne wody udostępnione w bibliotece Thermal Liquid Settings (TL). Biblioteka definiuje własności termodynamiczne takie jak: gęstość, właściwa energia wewnętrzna i ciepło właściwe, pochodne: moduł objętościowy, współczynnik rozszerzalności cieplnej, oraz transportowe: lepkość kinematyczna i przewodność cieplna. Charakterystykę tego modelu wody w postaci graficznej przedstawiono na rysunku 6.3.



Rys. 6.3. Charakterystyka właściwości fizycznych wody [132]

Fig. 6.3. Characteristics of the physical properties of water

W tabeli 6.1 zestawiono wybrane grafiki wykorzystane w modelu fizycznym MatLab-Simulink. Pierwszy element reprezentuje masę cieplną, która odzwierciedla zdolność materiału lub kombinacji materiałów do magazynowania energii wewnętrznej.

Opór cieplny to w tym przypadku „abstrakcyjna” wielkość, która wiąże przewodność cieplną, współczynnik przenikania ciepła i współczynnik promieniowania. Blok „Opór cieplny” umożliwia modelowanie wymiany ciepła w sposób uogólniony, niezależnie od tego, czy odbywa się to poprzez przewodzenie, konwekcję, promieniowanie czy ich kombinację.

Kolejny blok reprezentuje odcinek rurociągu ze stałą objętością wody. W cieczy modelowane są straty ciśnienia spowodowane lepkością i przenoszeniem ciepła w wyniku konwekcji między cieczą, a ścianą rury. Lepkość określana jest równaniem Darcy’ego-Weisbacha, współczynnik wymiany ciepła wyznaczany z wykorzystaniem liczby Nusselta.

Blok umożliwia uwzględnienie efektów dynamicznej ściśliwości i bezwładności płynu. Włączenie każdego z tych efektów może poprawić wierność modelu kosztem zwiększonej złożoności równań i potencjalnie zwiększonego kosztu symulacji.

Gdy ściśliwość dynamiczna nie jest uwzględniona, zakłada się, że ciecz przebywa w rurze przez nieistotny czas. Zatem w rurze nie gromadzi się masa, a dopływ masy równa się wypływowi masy. To najprostsza opcja. Jest to właściwe, gdy masa cieczy w rurze stanowi znikomy ułamek całkowitej masy cieczy w układzie.

Gdy uwzględniona jest ściśliwość dynamiczna, to brak równowagi pomiędzy dopływem i odpływem masy może spowodować gromadzenie się lub zmniejszanie objętości cieczy w rurze. W rezultacie ciśnienie w rurze może dynamicznie rosnać i spadać, co zapewnia pewną podatność systemu i moduluje szybkie zmiany ciśnienia. Jest to opcja domyślna.

Jeśli uwzględniona jest ściśliwość dynamiczna, można także uwzględnić bezwładność płynu. Efekt ten skutkuje dodatkowym oporem przepływu, oprócz oporu spowodowanego tarciem. Ten dodatkowy opór jest proporcjonalny do szybkości zmiany masowego natężenia przepływu. Uwzględnianie bezwładności płynu spowalnia szybkie zmiany natężenia przepływu, ale może również powodować jego przekroczenie i oscylacje. Ta opcja jest odpowiednia w przypadku bardzo długiej rury.

Tab. 6.1. Podstawowe bloki (ikony), wykorzystane w modelu fizycznym MatLab-Simulink

Tab. 6.1. Basic blocks (icons) used in the MatLab-Simulink physical model

---



Masa cieplna [133]

---



Opór cieplny [134]

---



Odcinek rurociągu [135]

---

Masę cieplną opisuje równanie (6.1)

$$Q = c \cdot m \frac{dT}{dt} \quad (6.1)$$

gdzie:

Q - strumień ciepła,  $W$

c - ciepło właściwe materiału masowego,  $J/kg \cdot K$

m - masa,  $kg$

T - temperatura,  $K$

t - czas,  $s$

Równanie przenikania ciepła dla bloku oporu cieplnego opisano wzorem (6.2):

$$R \cdot Q = \Delta T \quad (6.2)$$

gdzie:

R - opór cieplny,  $m^2K/W$

Q - strumień ciepła,  $W$

$\Delta T$  - różnica temperatur pomiędzy warstwami,  $K$

Opór cieplny jest powiązany z innymi wielkościami wymiany ciepła. Opisany jest równaniem (6.3):

$$R = \frac{d}{k \cdot A} = \frac{1}{h \cdot A} = \frac{1}{r \cdot A(T_A^2 + T_B^2)(T_A + T_B)} \quad (6.3)$$

gdzie:

d - grubość materiału, czyli odległość między warstwami,  $m$

A - obszar normalny do kierunku przepływu ciepła,  $m^2$

k - przewodność cieplna materiału,  $W/mK$

h - współczynnik przenikania ciepła w wyniku konwekcji,  $W/m^2K$

r - współczynnik promieniowania,  $Sv/Gy$ ; ( $rem/Gy$ )

$T_A$ ;  $T_B$  - temperatury odpowiednio w portach A i B,  $K$

Zależności masowe z natężeniami przepływu przez porty A i B przedstawiono na równaniu (6.4):

$$\dot{m}_A + \dot{m}_B = \begin{cases} 0, & \text{jeśli ściśliwość dynamiczna płynu nie jest uwzględniona} \\ V\rho \frac{1}{\beta} \frac{dp}{dt} - \alpha \frac{dT}{dt}, & \text{jeśli ściśliwość dynamiczna płynu jest uwzględniona} \end{cases} \quad (6.4)$$

gdzie:

$\dot{m}_A$ ;  $\dot{m}_B$  - masowe strumienie przepływu przez porty A i B,  $kg/s$

V - objętość płynu w rurze,  $m^3$

$\rho$  - gęstość wody w rurze,  $kg/m^3$

$\beta$  - izotermiczny moduł objętościowy rury,  $m^3$

$\alpha$  - izobaryczny współczynnik rozszerzalności cieplnej w rurze,  $1/K$

p - termiczne ciśnienie wody w rurze,  $MPa$

T - temperatura wody w rurze,  $K$

Tabela 6.2 pokazuje równania zachowania pędu dla każdej połowy rury

Tab. 6.2. Równania zachowania pędu dla każdej połowy rury

Table 6.2. Momentum conservation equations for each half of the pipe

Dla połowy rury przylegającej do portu A	$p_A - p = \begin{cases} \Delta p_{v,a}, & \text{jeśli bezwładność płynu nie jest uwzględniona} \\ \Delta p_{v,a} - \frac{L}{2S} \dot{m}_A, & \text{jeśli bezwładność płynu jest uwzględniona} \end{cases}$
Dla połowy rury przylegającej do portu B	$p_B - p = \begin{cases} \Delta p_{v,a}, & \text{jeśli bezwładność płynu nie jest uwzględniona} \\ \Delta p_{v,a} - \frac{L}{2S} \dot{m}_A, & \text{jeśli bezwładność płynu jest uwzględniona} \end{cases}$

gdzie:

S - pole przekroju poprzecznego rury,  $m^2$

p,  $p_A$  i  $p_B$  - ciśnienia cieczy w rurze, w porcie A i porcie B,  $MPa$

$\Delta p_{v,A}$  i  $\Delta p_{v,B}$  - straty ciśnienia w wyniku tarcia lepkiego pomiędzy środkiem objętości rury, a przyłączami A i B,  $MPa$

Straty ciśnienia w wyniku lepkości pokazano na równaniach przedstawionych w tabeli 6.3.

Tab. 6.3. Równania utraty ciśnienia w wyniku lepkości dla każdej połowy rury

Table 6.3. Viscous pressure loss equations for each half pipe

Dla połowy rury przylegającej do portu A	$\Delta p_{v,A} = \begin{cases} \lambda v \left( \frac{L + L_{eq}}{2} \right) \frac{\dot{m}_A}{2D^2 S}, & \text{jeśli } Re_A < Re_l \\ f_A \left( \frac{L + L_{eq}}{2} \right) \frac{\dot{m}_A  \dot{m}_B }{2\rho D S^2}, & \text{jeśli } Re_A \geq Re_t \end{cases}$
Dla połowy rury przylegającej do portu B	$\Delta p_{v,B} = \begin{cases} \lambda v \left( \frac{L + L_{eq}}{2} \right) \frac{\dot{m}_A}{2D^2 S}, & \text{jeśli } Re_B < Re_l \\ f_B \left( \frac{L + L_{eq}}{2} \right) \frac{\dot{m}_B  \dot{m}_B }{2\rho D S^2}, & \text{jeśli } Re_B \geq Re_t \end{cases}$

gdzie:

$\lambda$  - współczynniki kształtu rury,  $1/m$

v - lepkość kinematyczna wody w rurze,  $m^2 \cdot s^{-1}$

$L_{eq}$  - łączna długość równoważna lokalnych oporów rur

D - średnica rury,  $m$

$f_A$  i  $f_B$  - współczynniki tarcia Darcy'ego w połówkach rur sąsiadujących z przyłączami A i B

$Re_A$  i  $Re_B$  - liczby Reynoldsa na portach A i B

$Re_l$  - liczba Reynoldsa, powyżej której przepływ przechodzi w turbulentny

$Re_t$  - liczba Reynoldsa, poniżej której przepływ przechodzi w laminarny

Współczynniki tarcia Darcy'ego wynikające z przybliżenia Haalanda dla przepływu turbulentnego przedstawiono na równaniu (6.5):



$$f = \frac{1}{\left[-1,8 \log_{10} \left(\frac{6,9}{Re} + \frac{1r}{3,7D}\right)^{1,11}\right]^2} \quad (6.5)$$

gdzie:

$f$  - współczynnik tarcia Darcy'ego

$r$  - chropowatość powierzchni rury,  $\mu m$

Równanie zachowania energii dla rury (bilansu energetycznego) przedstawiono na równaniu (6.6):

$$V \frac{d(\rho u)}{dt} = \phi_A + \phi_B + Q_H \quad (6.6)$$

gdzie:

$\phi_A$  i  $\phi_B$  - całkowite natężenie przepływu energii do rury przez porty A i B,  $W$

$Q_H$  - natężenie przepływu ciepła do rury przez ściankę rury,  $W$

Natężenie przepływu ciepła pomiędzy wodą, a ścianką rury (przez ścianę) przedstawiono na równaniu (6.7):

$$Q_H = Q_{conv} + \frac{kS_H}{D} (T_H - T) \quad (6.7)$$

gdzie:

$Q_H$  – natężenie przepływu ciepła,  $W$

$Q_{conv}$  - część natężenia przepływu ciepła przypisywana konwekcji przy niezerowych natężeniach przepływu,  $W$

$k$  - przewodność cieplna wody w rurze,  $W/(m \cdot K)$

$S_H$  - powierzchnia ścianki rury, będąca iloczynem obwodu i długości rury,  $m^2$

$T_H$  - temperatura na ściance rury,  $K$

Zakładając wykładniczy rozkład temperatury wzdłuż rury, konwekcyjne przenoszenie ciepła wynosi (równanie 6.8):

$$Q_{conv} = |\dot{m}_{avg}| c_{p, avg} (T_H - T_{in}) \left(1 - \exp\left(\frac{h_{coeff} S_H}{|\dot{m}_{avg}| c_{p, avg}}\right)\right) \quad (6.8)$$

gdzie:

$\dot{m}_{avg} = (\dot{m}_A - \dot{m}_B)/2$  - średnie masowe natężenie przepływu z punktu A do punktu B,  $W$

$c_{p, avg}$  - ciepło właściwe obliczane w średniej temperaturze,  $J/kgK$

$T_{in}$  - temperatura na wlocie zależna od kierunku przepływu,  $K$

Współczynnik przenikania ciepła zależy od liczby Nusselta, przedstawiono na równaniu (6.9):

$$h_{coeff} = Nu \frac{k_{avg}}{D} \quad (6.9)$$

$k_{avg}$ , to przewodność cieplna oceniana w średniej temperaturze. Liczba Nusselta zależy od warunków przepływu. W warunkach przepływu laminarnego jest stała. Liczba Nusselta w przepływie turbulentnym jest obliczana na podstawie korelacji Gnielińskiego (równanie 6.10):

$$Nu_{tur} = \frac{\frac{f_{avg}}{8}(Re_{avg}-1000)Pr_{avg}}{1+12,7\sqrt{\frac{f_{avg}}{8}(Pr_{avg}^{2/3}-1)}} \quad (6.10)$$

$f_{avg}$  to współczynnik tarcia Darcy'ego przy średniej liczbie Reynoldsa,  $Re_{avg}$ , a  $Pr_{avg}$  to liczba Prandtla obliczona w średniej temperaturze. Średnią liczbę Reynoldsa oblicza się jako:

$$Re_{avg} = \frac{|\dot{m}_{avg}|D}{S\mu_{avg}} \quad (6.11)$$

$\mu_{avg}$  to lepkość dynamiczna dla średniej temperatury. Gdy średnia liczba Reynoldsa mieści się pomiędzy górną granicą przepływu laminarnego, a dolną granicą przepływu turbulentnego, liczba Nusselta płynnie przechodzi pomiędzy wartościami dla przepływu laminarnego i turbulentnego.

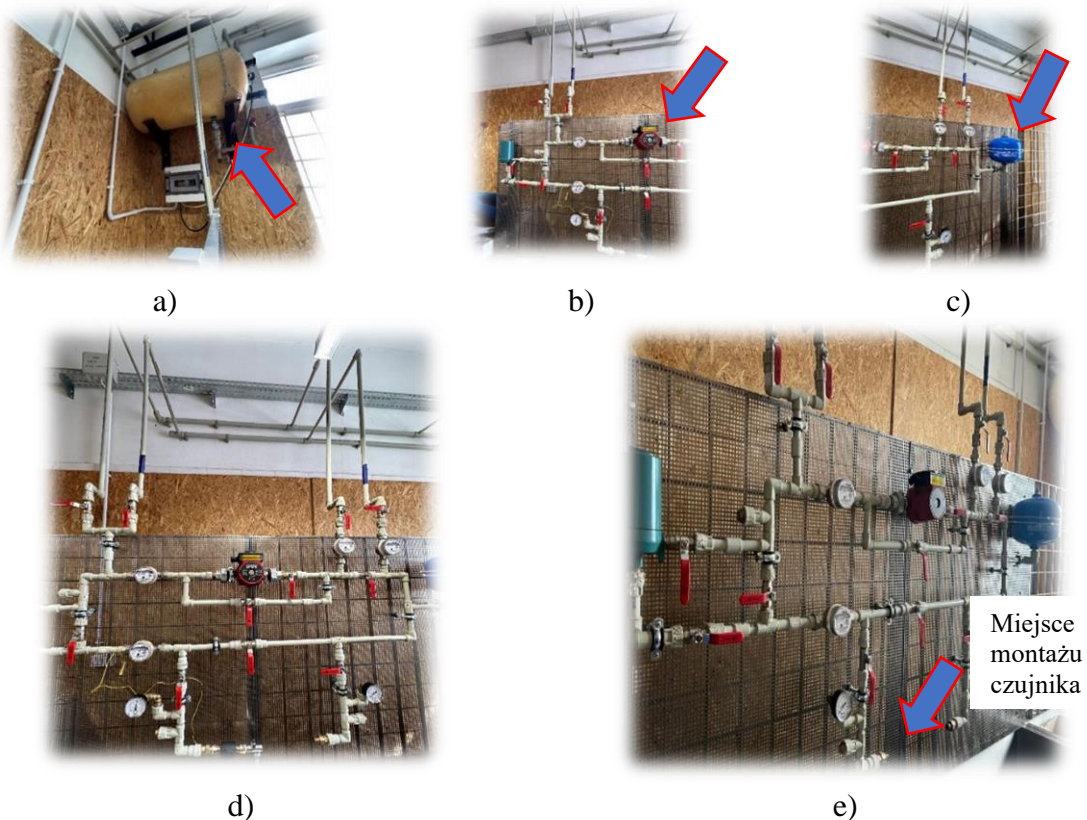
Założenia i ograniczenia:

- Ściana rury jest sztywna.
- Przepływ jest w pełni rozwinięty.
- Wpływ grawitacji jest znikomy.

Model oraz program stworzony w środowisku MatLab służą do obliczeń i wyznaczania wartości temperatury oraz stałych czasowych celem wyznaczenia strumienia przepływu oraz grubości kamienia. Skatalogowane charakterystyki stałych czasowych dla danych wartości przepływów pozwolą wyznaczać w konstruowanym urządzeniu wartość strumienia przepływu [136] [137].

## 7. Stanowisko laboratoryjne i badania eksperymentalne

W celu weryfikacji i kalibracji modelu numerycznego oraz modelu w systemie Simscape przygotowano stanowisko badawcze pozwalające testować różne wersje prototypowe proponowanego rozwiązania. Stanowisko pomiarowe zostało wyposażone w instalację hydrauliczną, która zawiera niezbędne elementy, takie jak urządzenia do monitorowania przepływu wody, termometry, pompę obiegową, ciśnieniomierz, bufor ciepły, filtry, naczynia wyrównawcze, zawory mieszające oraz element stanowiący prototyp rozwiązania. Stanowisko zostało wykonane według odpowiednich standardów i przetestowane pod kątem potencjalnych wycieków oraz wad instalacyjnych. Stanowisko umożliwia prace w obiegu zamkniętym poprzez wielokrotne wykorzystanie wody. Na rysunkach 7.1 a) - e) przedstawiono skonstruowane stanowisko pomiarowe.



Rys. 7.1. Widok stanowiska pomiarowego: a) zbiornik, b) pompa obiegowa, c) naczynie przeponowe, d) widok ogólny, e) miejsce montażu czujnika

Fig. 7.1. View of the measuring station: a) tank, b) circulating pump, c) diaphragm vessel, d) general view, e) sensor mounting location

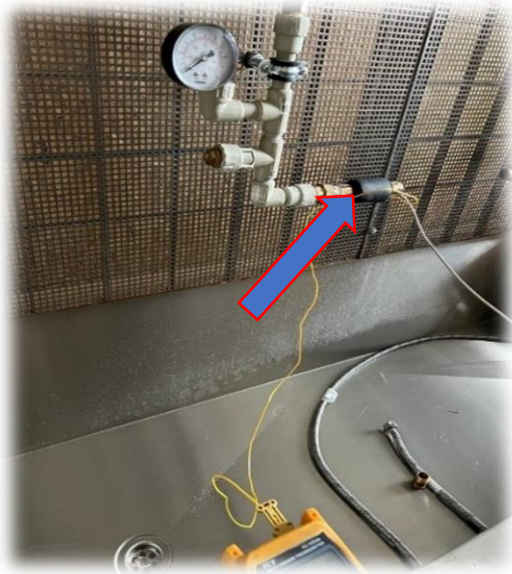
Prototyp urządzenia pomiarowego będącego częścią systemu pomiaru przepływu skonstruowano jako miedziany pierścień o średnicy równej średnicy wewnętrznej rury. Do pomiaru temperatury wykorzystano czujnik temperatury typu K, umieszczając ją we wgłębieniu pierścienia o grubości 1 mm, który wymienia ciepło z przepływającą wodą. W pierścieniu przygotowano wgłębienie o głębokości 0.5 mm i w nim umieszczono czujnik temperatury. Obszar mocowania czujnika temperatury we wgłębieniu pierścienia wypełniony został pastą termoprzewodzącą. Do mocowania wykorzystano opaskę zaciskową, zapewniając trwale osadzenie czujnika temperatury we wgłębieniu. Czujnik temperatury i pierścień zaizolowano celem wyeliminowania wymiany ciepła z otoczeniem. Do rejestracji zmian temperatury w czasie wykorzystano 4- kanałowy termometr YC-747UD (rysunek 7.3) z rejestracją danych i możliwością wysyłania danych do komputera. Procedura pomiarowa wymaga dokładnych wskazań temperatury. Do weryfikacji czujnika temperatury wykorzystano piec kalibracyjny Fluke® 9142 (rysunek 7.4) dysponujący certyfikatem kalibracyjnym nr B7908006. Rysunek 7.2 przedstawia prototyp urządzenia pomiarowego.



Rys. 7.2. Widok prototypu PCP

Fig. 7.2. View of PCP prototype

Na rysunku 7.3 przedstawiono zamontowanego i zaizolowanego prototypu elementu pomiarowego. W stosunku do wersji końcowej przyjęta budowa prototypu jest uproszczona, jednak ze względu na badane zjawisko jakościowo odpowiada przyjętym później rozwiązaniom.



a)



b)

Rys. 7.3. a) Widok prototypu urządzenia pomiarowego zamontowany na stanowisku pomiarowym, b) Widok czterokanałowego miernika temperatury YC-747UD

Fig. 7.3. a) View of prototype of the measuring element mounted on the measuring station, b) four-channel temperature meter YC-747UD



a)



b)

Rys. 7.4. Piec kalibracyjny Fluke® 9142, a) Widok, b) Certyfikat kalibracji

Fig. 7.4. Fluke® 9142 calibration oven, a) View, b) Calibration certificate

Wstępne pomiary przeprowadzono nagrzewając pierścień pomiarowy przepływającą wodą. W momencie ustania przepływu i ustabilizowania temperatury pierścienia otwarto przepływ wody o niższej temperaturze i rozpoczęło rejestrację czasu chłodzenia pierścienia do stanu ustalonego czyli temperatury wody o niższej temperaturze. Wstępne charakterystyki potwierdzają zależności obliczone poprzez model numeryczny. Pomiary wykazały zależność chłodzenia pierścienia od strumienia przepływającego płynu (w tym wypadku wody). Rozważano różne warianty nagrzewania pierścienia, tak aby zoptymalizować ten proces, w tym nagrzewanie pierścienia pomiarowego drutem oporowym oraz grzałką opaskową (rysunek 7.5).

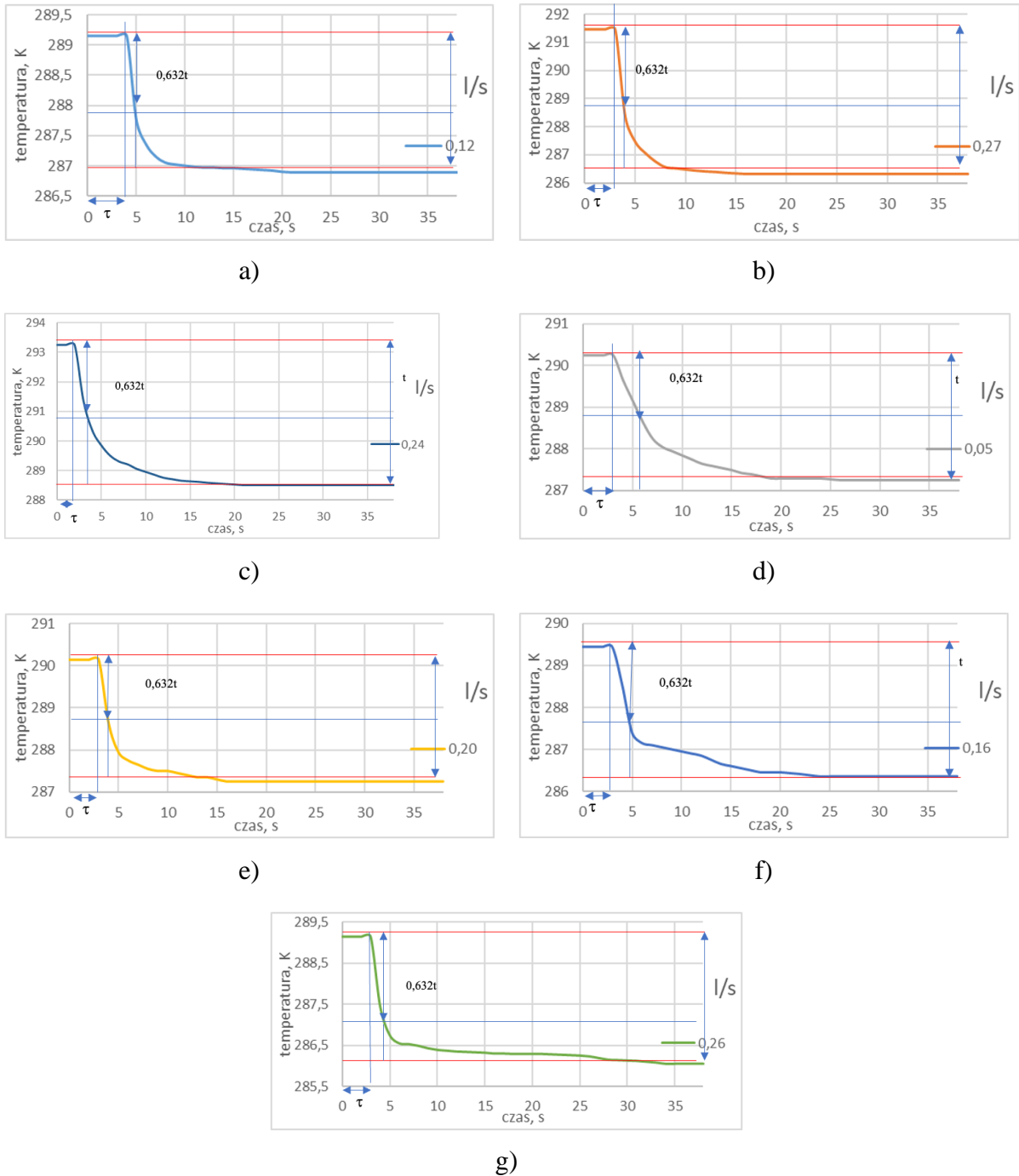


Rys. 7.5. Widok grzałki opaskowej

Fig. 7.5. View of band heater

## 7.1. Wyniki pomiarów eksperymentalnych

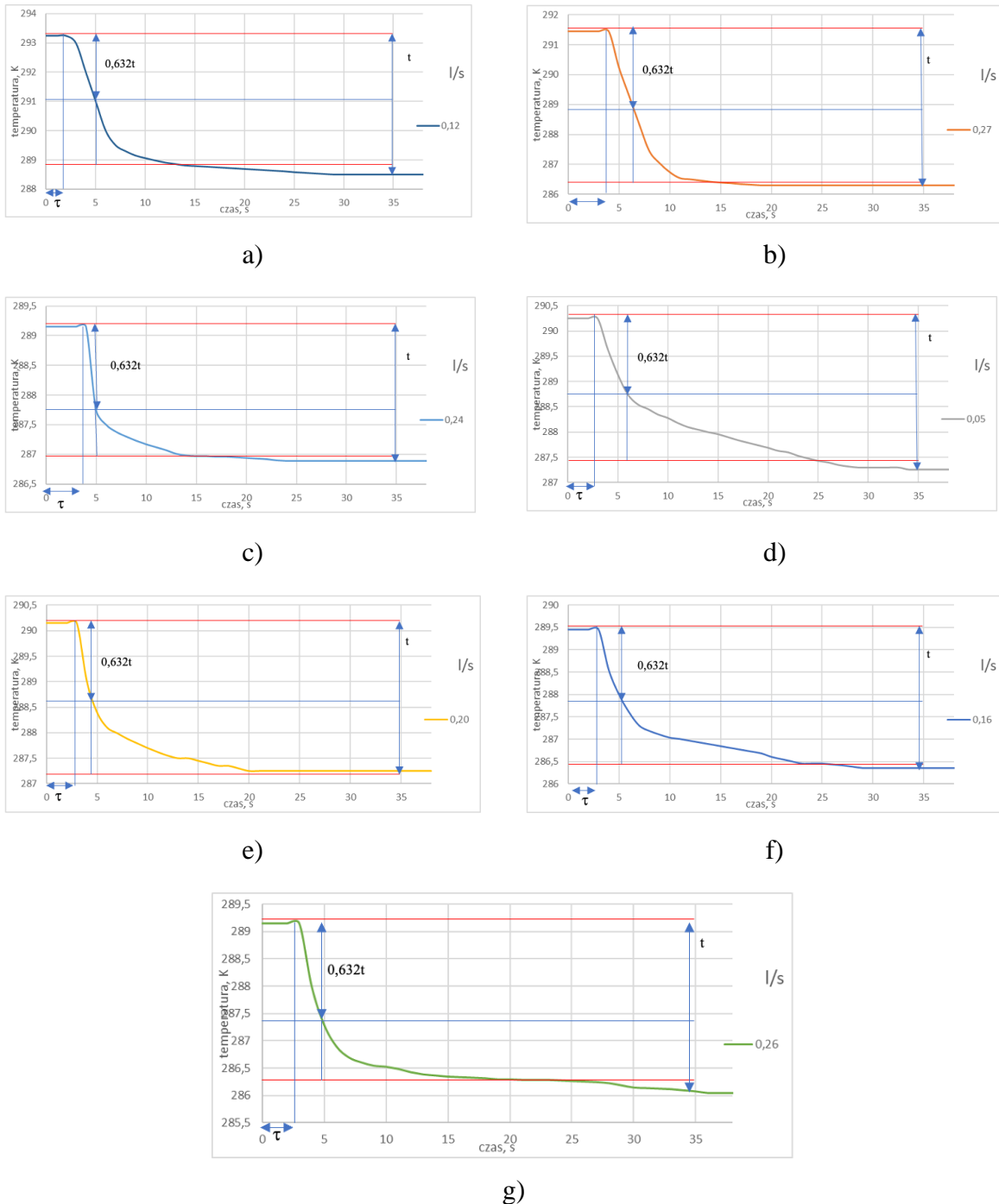
Na rysunku 7.6 przedstawiono wybrane charakterystyki czasowo-temperaturowe chłodzenia PCP bez warstwy izolacji.



Rys. 7.6 a-g. Wybrane charakterystyki czasowo-temperaturowe chłodzenia PCP bez warstwy izolacji

Fig. 7.6 a-g. Selected time-temperature characteristics of PCP cooling without an insulation layer

Na rysunku 7.7 przedstawiono wybrane charakterystyki czasowo-temperaturowe chłodzenia PCP z warstwą izolacji.

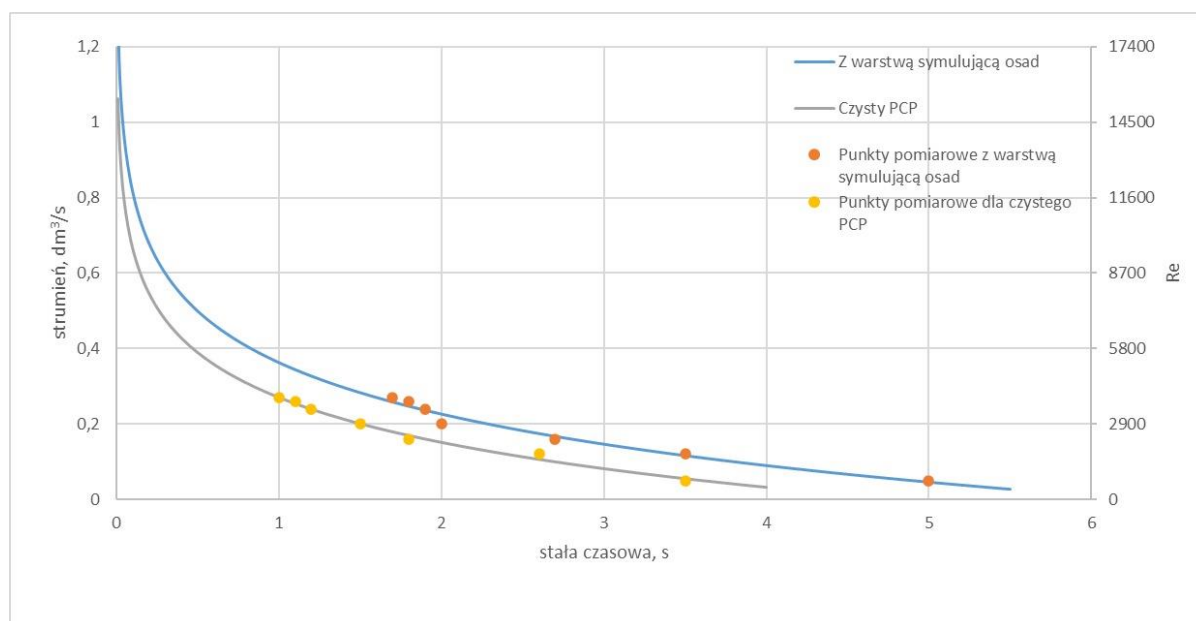


Rys. 7.7 a-g. Wybrane charakterystyki czasowo-temperaturowe chłodzenia PCP z warstwą izolacji  
 Fig. 7.7 a-g. Selected time-temperature characteristics of PCP cooling with an insulation layer



Rysunki 7.6 oraz 7.7 pokazują istotę zjawiska w warunkach rzeczywistych. Z przyczyn obiektywnych<sup>3</sup> badania zostały przeprowadzone w sposób możliwie najefektywniejszy. Przeprowadzone pomiary są natury jakościowej, a nie ilościowej. Ograniczone możliwości badawcze pozwoliły na rejestrację przepływów jedynie w zakresie przepływu laminarnego (wysokie stałe czasowe).

Na rysunku 7.8 przedstawiono charakterystyki wynikowe dla pomiarów wykonanych w warunkach bez i z symulacją warstwy osadu kamiennego.



Rys. 7.8. Charakterystyki wynikowe dla pomiarów wykonanych w warunkach bez i z symulacją warstwy osadu kamiennego

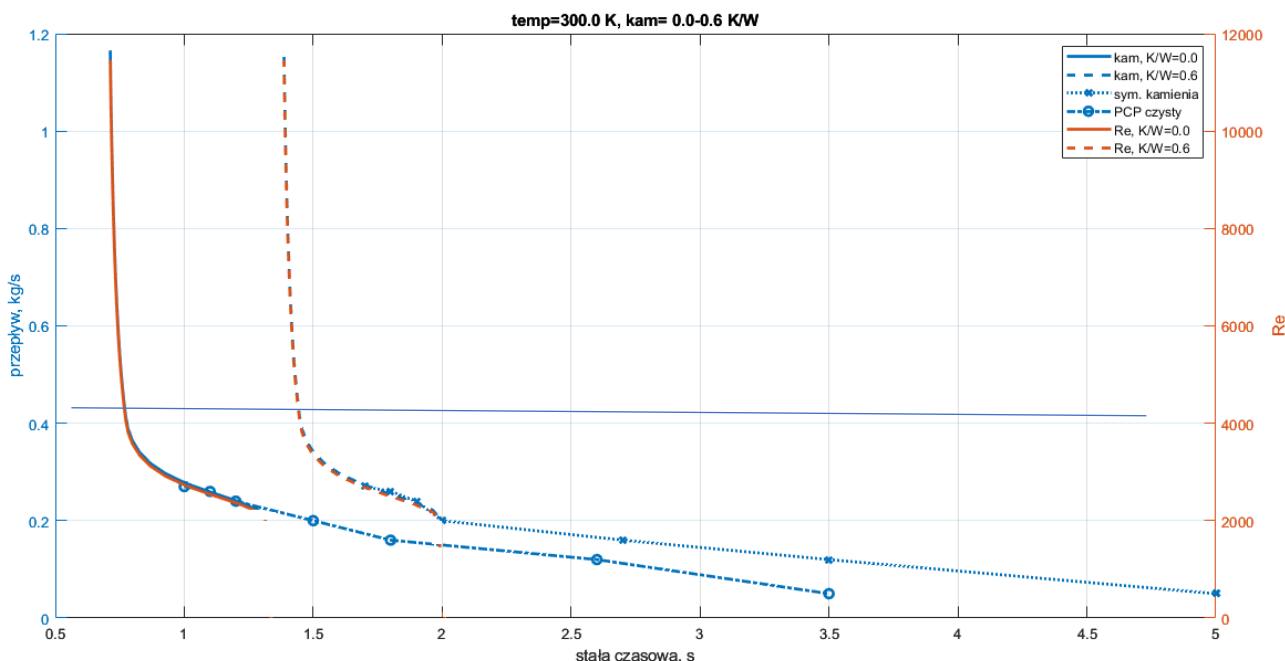
Fig. 7.8. Characteristics of the results for measurements made under conditions without and with simulation of the sediment layer

Dla punktów pomiarowych wyznaczonych na podstawie charakterystyk przedstawionych na rys. 7.6 i 7.7 dopasowano funkcję. Dla charakterystyk z rys. 7.8 wyznaczono również liczbę Reynoldsa. Zauważono podobnie jak w modelu obliczeniowym przesunięcie przepływu turbulentnego w kierunku wyższych wartości Re, co spowodowane jest występowaniem przepływu laminarnego w warstwie przyściennej.

<sup>3</sup> Cały okres badań laboratoryjnych przypada na czas pandemii gdzie dostęp do laboratoriów był zabroniony z przyczyn trudnych do przewidzenia wcześniej oraz niezależnych od Autora.

## 7.2. Kalibracja modelu Simscape w środowisku MatLab

Model fizyczny MatLab-Simscape został skalibrowany, przyjmując wyniki pomiarów rzeczywistych, co przedstawiono na rysunku 7.9. Uzyskane wyniki pomiarów obejmowały tylko fragment charakterystyki. Pomiary całego przebiegu nie były możliwe ze względów zarówno dostępnego wyposażenia technicznego, jak również obiektywnych, związanych z okresem pandemii. Niemniej jednak przyjęto, że zgodność fragmentu charakterystyki jest wystarczająca do potwierdzenia poprawności modeli. Wydaje się to być wystarczająco racjonalne założenie, zgodność chociażby fragmentu charakterystyki w tak złożonym modelu nie może wynikać z przypadku.



Rys. 7.9. Charakterystyka zależności stałej czasowej od natężenia przepływu po kalibracji modelu dla pomiarów rzeczywistych. Charakterystyka modelu oznaczona jest kolorem pomarańczowym, wyniki pomiarów oznaczono kolorem niebieskim

Fig. 7.9. Characteristics of the dependence of the time constant on the flow rate after calibration of the model for real measurements. The characteristics of the model are marked in orange, the results of the measurements are marked in blue

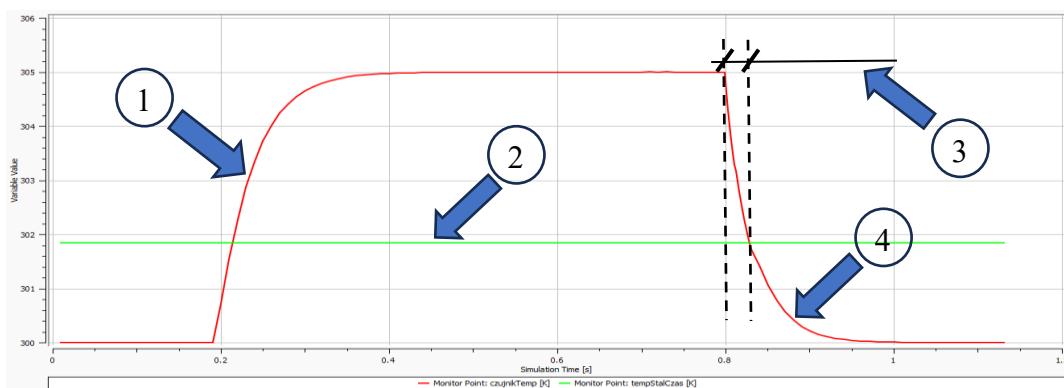
Model pomiarowy został skalibrowany wykorzystując stałe czasowe obliczone na podstawie badań przeprowadzonych na stanowisku pomiarowym. Ograniczenia stanowiska badawczego pozwalają na pomiary jedynie długich stałych czasowych, stąd punkty pomiarowe wyznaczone są jedynie dla niewielkich strumieni przepływów, gdzie dominuje wciąż przepływ laminarny.

## 8. Wyniki badań analitycznych

### 8.1. Definicja wyniku pomiaru

Wynik pomiaru to parametr zbliżony do stałej czasowej, nie jest to jednakże stała czasowa w jej sensie definicyjnym. Definicja stałej czasowej opisuje wartość o wymiarze czasu charakteryzująca osiągnięcie przez wybrany parametr stanu ustalonego. Tym parametrem w rozpatrywanym przypadku jest temperatura dedykowanego czujnika temperatury. Definicja opisuje stałą czasową jako parametr właściwie konstrukcyjny, który jest cechą której nie można zmienić. Szczegółowy opis definicji znajdujemy w bardzo wielu opracowaniach [73, 97, 98].

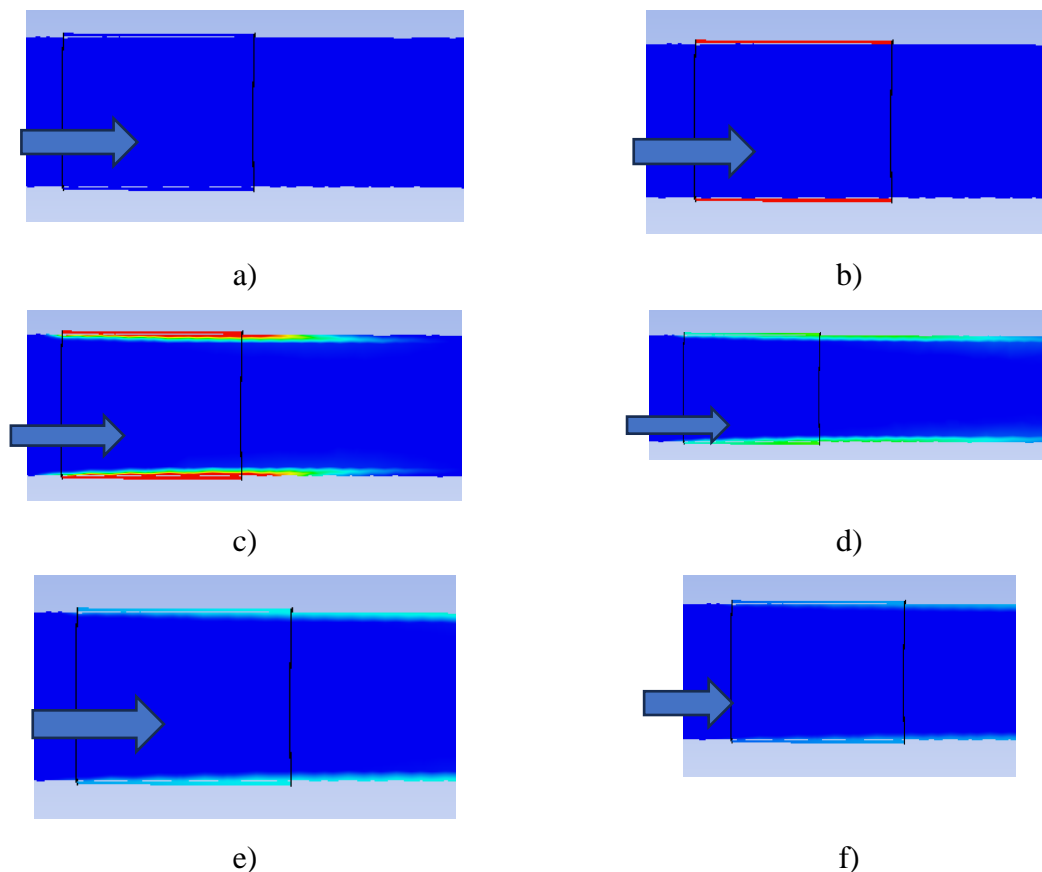
W naszym przypadku wynikiem pomiaru jest odstępstwo różnica pomiędzy tak rozumianą stałą czasową początkową (nominalną) a stałą czasową aktualną. Mierzymy wartość identycznie jak dla definicji stałej czasowej, ale ze względu na zmieniające się warunki pomiaru, różne strumienie i różne grubości osadów, otrzymujemy inne wyniki niż te początkowe. Na podstawie tych różnic wnioskujemy o odstępstwach, czyli o wartości strumienia płynącego przez rurociąg. W uproszczeniu istotę pomiaru można przedstawić jako pomiar czasu który jest niezbędny dla termometru do osiągnięcia stanu zbliżonego do ustalonego po jego wcześniejszym nagraniu o zadaną wartość stałą powyżej temperatury strumienia wody. Ilustruje to rysunek 8.1. Wykorzystywane są więc warunki pomiarowe, które dla pomiaru klasycznej stałej czasowej byłyby określone jako błędne.



Rys. 8.1. Charakterystyka pracy czujnika; (1) krzywa nagrzewania, (2) poziom odniesienia (np. 0.632 stanu ustalonego), (3) wynik pomiaru (stała czasowa), (4) krzywa chłodzenia

Fig. 8.1. Characteristics of sensor operation; (1) heating curve, (2) reference level (e.g. 0.632 steady state), (3) measurement result (time constant), (4) cooling curve

Elementem czynnym urządzenia jest pierścień pomiarowy (PCP) wewnątrz rurociągu, która zawiera drutowy lub pierścieniowy czujnik temperatury. Szczegóły pokazano w rozdziale dotyczącym konstrukcji przepływomierza. Warto tu zauważyć, że element czynny który uzyskał temperaturę powyżej temperatury strugi płynu (wody), po ustaniu dostarczania ciepła uzyskuje nierównomierny rozkład temperatury wzdłuż osi przepływu. Wynika to z faktu, że kolejne przekroje są chłodzone z różną intensywnością. Warstwa przyścienna, jednocześnie się nagrzewa jak i przesuwa (rys. 8.2) w kierunku przepływu, a to zmienia warunki chłodzenia dla kolejnych przekrojów elementu czynnego. Biorąc powyższe pod uwagę można stwierdzić, że czynny element przyrządu w każdym swoim fragmencie pracuje inaczej, a to jest istotne odstępstwo od warunków pomiarowych stałej czasowej.



Rys. 8.2. Widok faz pracy czujnika (a,b,c,d,e,f). Widoczne nierównomierne warunki chłodzenia kolejnych przekrojów w kierunku przepływu

Fig. 8.2. View of sensor operation phases (a,b,c,d,e,f). Uneven cooling conditions of subsequent cross-sections in the direction of flow are visible

Zastępczy schemat elektryczny składa się z rezystora omywanego przez strugę ciecicy, który jest podgrzewany prądem samoogrzewania, przy pomiarze temperatury ten prąd

określany jest jako szkodliwy. Po ogrzaniu wyłącza się samoogrzewanie i rejestruje się zmianę rezystancji która jest wywołana ochładzaniem rezystora przez przepływającą ciecz.

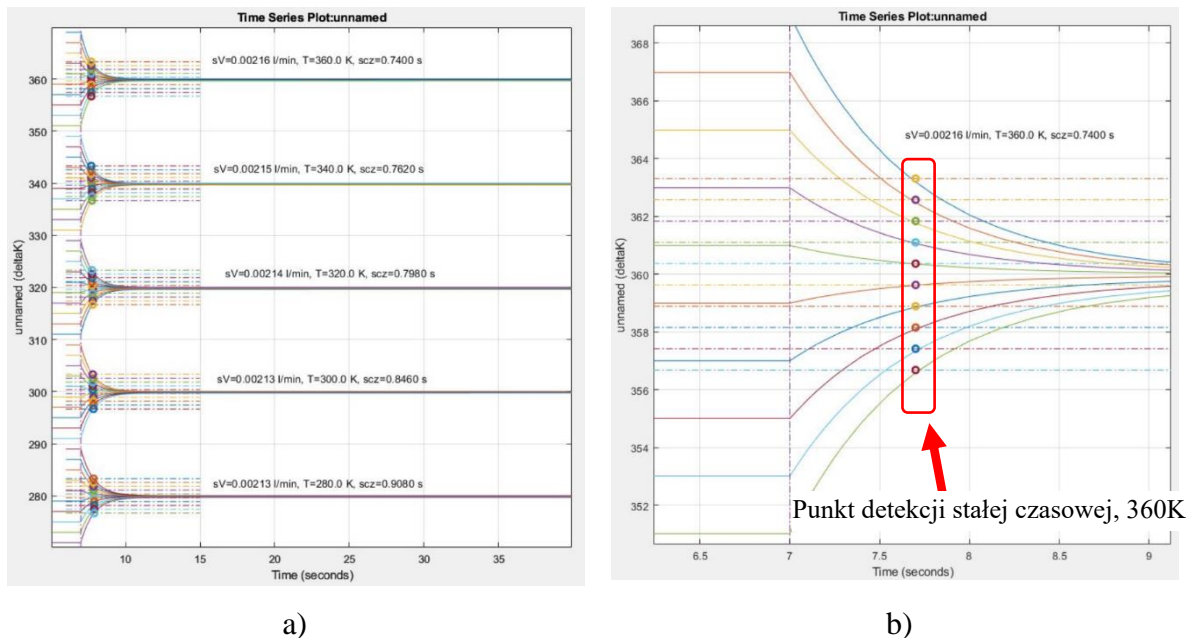
Analizując parametr nazywany umownie stałą czasową należy również zwrócić uwagę na różne fazy pracy czujnika. W pierwszej fazie czujnik jest nagrzewany. Oznacza to, że po ustaniu nagrzewania w pierwszej chwili na całej długości czynnej czujnika znajduje się warstwa przyścienna która w punkcie styku ma temperaturę czujnika, jest nagrzana prądem samoogrzewania, i jednocześnie przesuwa się w kierunku przepływu. Oznacza to różne warunki chłodzenia w każdym przekroju czujnika a tym samym różne temperatury. W efekcie końcowym przebieg chłodzenia czujnika jest zróżnicowany w każdym punkcie. Bardziej szczegółowo wyjaśniono to w rozdziale 10 dotyczącym dyskusji błędów pomiarowych.

## **8.2. Założenia upraszczające i parametry wpływu**

Projektowany przyrząd jest przeznaczony do pracy w zmiennych warunkach eksploatacyjnych. Zakłada się, że zakres dopuszczalnych wartości temperatury to od około 280K do 360K, a ciśnienie od 0.1 do 0.6 MPa. Ten zakres zmienności parametrów jest charakterystyczny dla wody wodociągowej i ciepłej wody użytkowej. Należy więc zweryfikować, czy te zmienne warunki pomiaru przepływu mają istotny wpływ na wynik pomiaru masowego strumienia przepływu, w przeciwnym przypadku należy wprowadzić korekty zależne od warunków, w których pomiar się odbywa.

Pozostaje jeszcze temperatura i ciśnienie otoczenia, ale jak wiadomo z wiedzy ogólnej, ich wpływ w poprawnie skonstruowanym systemie pomiarowym musi być całkowicie pomijalny. Odrębnym zagadnieniem jest wpływ różnych parametrów związanych z samą zastosowaną procedurą pomiarową, np. wpływ wysokości skoku temperatury na wynik pomiaru stałej czasowej. Wpływ ten w rzeczywistości nie ma miejsca, trudno bowiem zakładać, że poziom skoku temperatury zmieni stałą czasową układu. Niemniej jednak, sprawdzenie tego parametru kalibruje model obliczeniowy i tym samym poprawia jego wiarygodność oraz wiarygodność przeprowadzanych obliczeń. Wyniki uzyskanych symulacji testujących wpływ wysokości skoku temperatury powyżej, lub poniżej, stanu ustalonego na wartość symulowanego pomiaru przepływu pokazano na rysunkach 8.3a, 8.3b, 8.4. Np. dla stanu ustalonego równego 360K testowano skoki poziomu temperatur w zakresie +/- 8K (rys. 8.3b). Pierwszy wniosek ogólny jaki z tego wynika jest następujący – wpływ wysokości skoku temperatury powyżej lub poniżej stanu ustalonego (rys.8.3b, rys. 8.4) nie ma zauważalnego

wpływu na uzyskany wynik pomiaru stałej czasowej, a tym samym wyznaczonej wartości przepływu, co potwierdza poprawność modelu i obliczeń w tym aspekcie. Drugi wniosek dotyczy wpływu poziomu temperatury ustalonej na wynik pomiaru. Zanotowano tu pewne różnice, wynik pomiaru przepływu zmienił się od 2.13 l/min do 2.16 l/min dla temperatury ustalonej zmiennej w zakresie od 280K do 360K. Obliczona różnica wskazania wynosiła 0.03 l/min co stanowi wartość pomijalną w tego typu przyrządzie pomiarowym. Zakłada się bowiem, że wartości z drugiego miejsca po przecinku nie będą uwzględniane dla przepływów na poziomie pojedynczych litrów na minutę. Różnice widoczne na rysunku (8.3a) wynikają również z faktu, że gęstość wody jest funkcją temperatury a badana konstrukcja wykorzystuje zasadę pomiaru masowego. Ze względu na technikę modelowania łatwiej było jednakże zadawać strumień objętościowy i stąd widoczne pewne różnice w wartościach widocznych na rysunku.

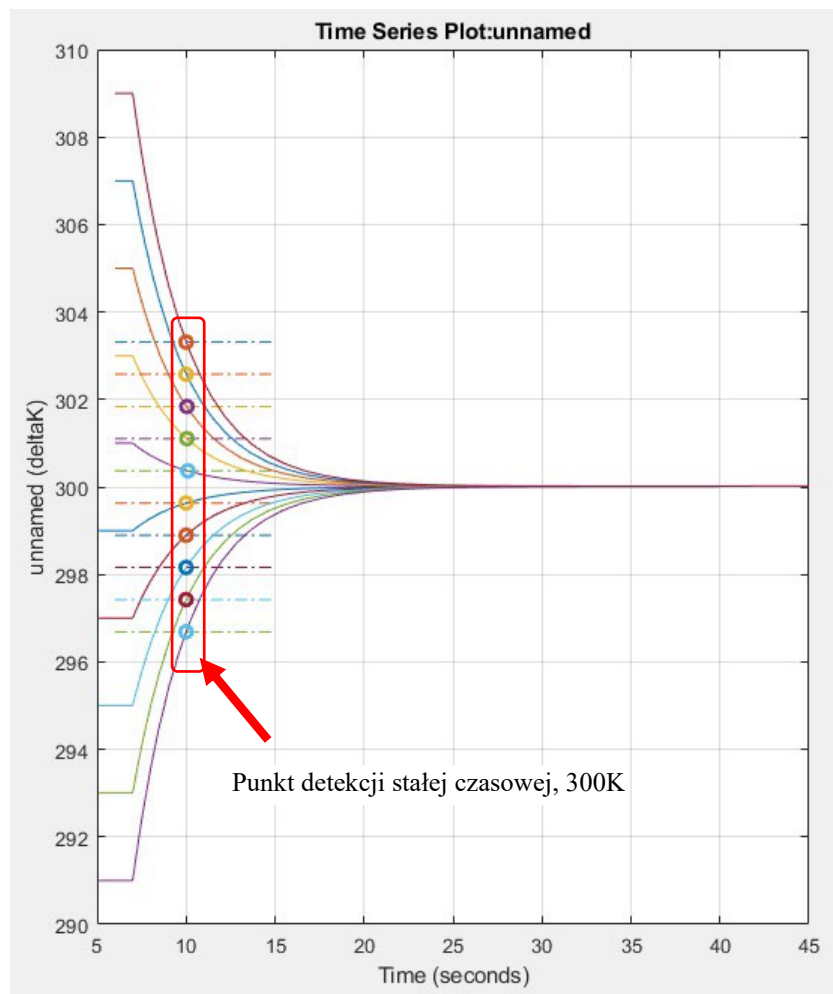


Rys. 8.3. Charakterystyka wpływu poziomu wartości temperatury wejściowej i ich różnicy na pomiar stałej czasowej: a) dla temperatury wody w zakresie 280K do 360K, b) przybliżenie dla jednej wybranej wartości temperatury (czerwonej ramce oznaczono punkty detekcji stałej czasowej, niezależnie od skoku temperatury stała czasowa jest identyczna)

Fig. 8.3. Characteristics of the effect of the level of input temperature values and their difference on the measurement of the time constant: a) for water temperature in the range of 280K to 360K, b) approximation for one selected temperature value (the red box indicates the detection points of the time constant, regardless of the temperature jump, the time constant is identical)

Odpowiednia poprawka ze względu na temperaturę wody została jednak w algorytmie pomiarowym uwzględniona, co ułatwi ewentualnie w przyszłości precyzyjne kalibrowanie przyrządu na stanowisku laboratoryjnym.

Na rysunku 8.4 przedstawiono powiększone charakterystyki chłodzenia i nagrzewania PCP dla różnych wartości różnicy temperatur i temperatury wody równej 300K.



Rys. 8.4. Charakterystyka zmiany temperatury PCP w czasie po wymuszonym skoku temperatury, poziom temperatury 300K

Fig. 8.4. Characteristics of PCP temperature change over time after a forced temperature jump, temperature level 300K

Oznaczone na wykresie punkty charakterystyczne to punkty pomiaru stałej czasowej dla temperatury wody równej 300K. Z przedstawionej charakterystyki wynika, że poziom temperatury końcowej, podczas nagrzewania elementu czynnego ponad temperaturę wody w rurociągu, dla innej temperatury wody, również nie wykazuje jej wpływu na wartość zmierzonej stałej czasowej w danych warunkach. To z kolei daje cenną wskazówkę konstrukcyjną, że system nagrzewania elementu czynnego nie musi zapewniać stabilnej, zawsze identycznej, wartości wzrostu temperatury ponad temperaturę wody. Na rysunku pokazano również sytuację gdy element czynny jest ochładzany, a następnie ogrzewa się do temperatury wody. Ten

przypadek jednakże nie jest rozpatrywany gdyż to by znacząco komplikowało konstrukcję urządzenia.

Odrębnym zagadnieniem pozostaje sam model matematyczny badanej konstrukcji. Zakłada się, że jest to model inercyjny pierwszego rzędu. Jest to pewnego rodzaju uproszczenie ponieważ osad kamienny wytrącony z czasem powoduje, że pojawia się dodatkowa masa pomiędzy czujnikiem (rezystorem), a strumieniem wody. To może zmienić nieco charakter modelu przesuując jego cechy w kierunku modelu inercyjnego drugiego rzędu. Wpływ ten jednak będzie minimalny ze względu na obecność wody, która w całej objętości zwilża osad kamienny. W takiej sytuacji dominującą rolę odgrywa przewodność cieplna osadu, która jest na bardzo niskim poziomie, około  $2.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Oznacza to, że pomiar grubości osadu poprzez pomiar stałej czasowej powinien być efektywny.

### **8.3. Modelowanie systemu pomiaru grubości osadu kamiennego oraz pomiaru strumienia przepływu**

Przygotowano dwa modele systemu do pomiaru strumienia przepływu w środowisku wody twardej oraz model detekcji osadów kamiennych według rozwiązania, na które otrzymano patent. Model wraz z oprogramowaniem jest niezbędny dla konstrukcji przepływomierza. Model poparty badaniami, po odpowiedniej optymalizacji pozwolił uzyskać charakterystyki na podstawie których wyznaczana będzie grubość osadu wewnątrz rurociągu oraz strumień przepływu. Idea działania oparta jest o pomiar temperatury oraz stałych czasowych. Przygotowano model w oprogramowaniu w systemie MatLab do obliczeń i wyznaczenia niezbędnych charakterystyk. Odpowiednie programy źródłowe dołączono w załączniku.

Ze względu na to, że system pomiaru jest ograniczony do jednego parametru, niezbędne jest zdefiniowanie odpowiedniego algorytmu pomiarowego, który wyznaczy mierzony przepływ. Na rysunku 8.5 przedstawiono algorytm postępowania dla system pomiaru przepływu oraz urządzenie do detekcji grubości osadów wewnątrz rurociągów. Dane graficzne użyte na rysunku 8.5 są przybliżone. W rzeczywistym urządzeniu konieczne jest ich dokładne skatalogowanie oraz precyzyjne wyznaczenie charakterystyk w możliwie wielu punktach dla danego zakresu przepływów, w których wykorzystywany będzie system pomiaru. W przypadku braku charakterystyki dla danego pomiaru konieczne będzie interpolowanie celem uzyskania grubości osadu lub w dalszym etapie strumienia przepływu.



1. Pomiar grubości osadu kamiennego na podstawie pomiaru stałej czasowej chłodzenia czujnika temperatury. Pomiar ten odbywa się przy cieczy znajdującej się w spoczynku.



2. Odczyt grubości osadu kamiennego na podstawie odpowiednio eksperymentalnie przygotowanych wykresów zależności grubości osadu i stałej czasowej. Grubość warstwy osadu jest wyznaczana w zastępczej jednostce zdefiniowanej jako K/W, co właściwie określa izolacyjność cieplną.



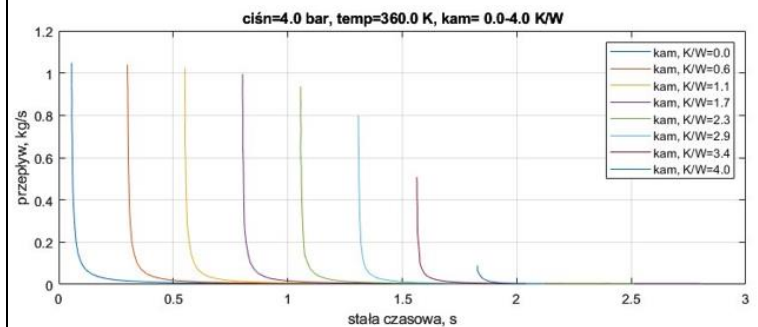
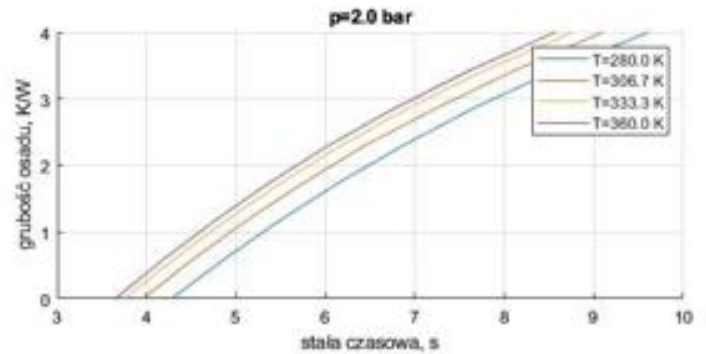
3. Dobór odpowiednio eksperymentalnie przygotowanych wykresów zależności prędkości strumienia przepływającej wody i stałej czasowej dla wyznaczonej grubości osadu.



4. Pomiar prędkości strumienia przepływającej wody na podstawie pomiaru stałej czasowej chłodzenia czujnika temperatury przy wyznaczonej wcześniej grubości osadu.



5. Odczyt prędkości strumienia przepływającej wody na podstawie odpowiednio eksperymentalnie przygotowanych wykresów zależności prędkości strumienia i stałej czasowej. Prędkość przepływu wyznaczana jest w jednostce kg/s.



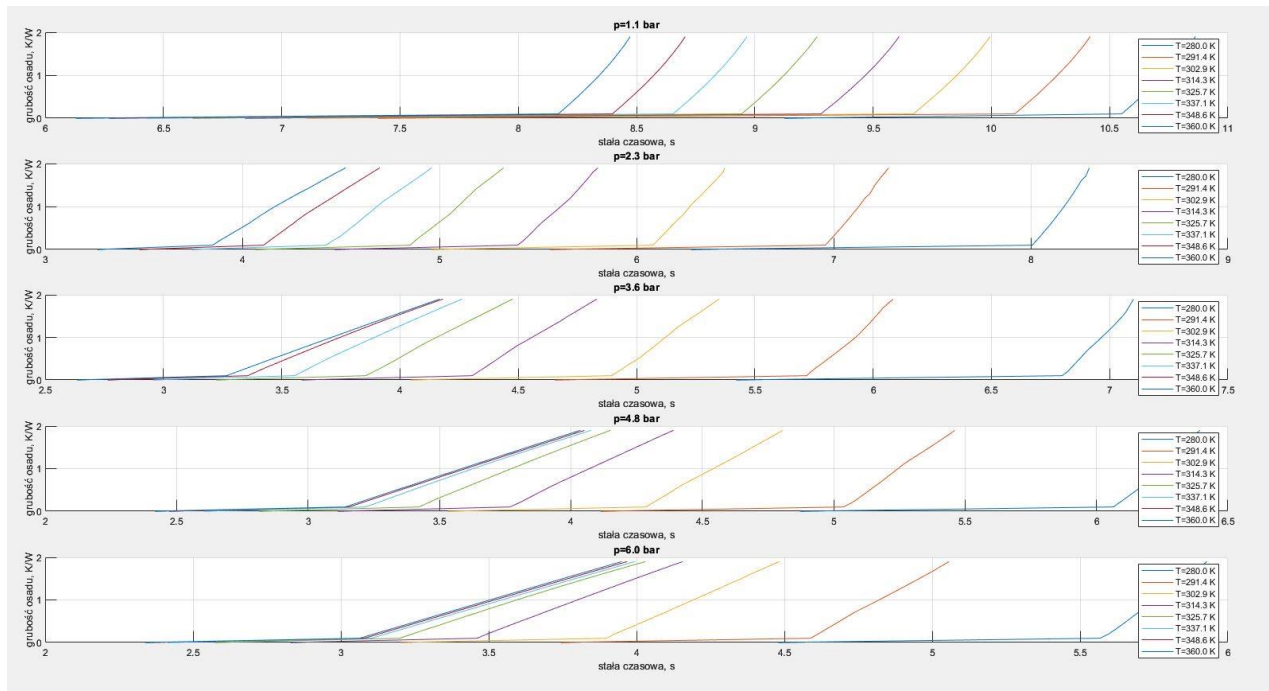
Rys. 8.5. Cykl (kolejność) postępowania w pomiarach

Fig. 8.5. Cycle (sequence) of measurement procedures

Pomiary, w proponowanym algorytmie, są wykonywane dwukrotnie. W pierwszym kroku wykonuje się pomiar grubości osadu kamiennego. Ten pomiar jest wykonywany przy zerowym przepływie i w sytuacji gdy rurociąg jest wypełniony wodą. Nasuwa się pytanie, czy można wykryć obecność wody w rurociągu. Ta detekcja jest możliwa poprzez obserwację szybkości narastania temperatury przy ogrzewaniu części pomiarowej. W przypadku suchego rurociągu gradienty przyrostów temperatury będą znacznie większe. Jeżeli obecność wody jest potwierdzona i nie występuje przepływ to można przystąpić do pomiaru grubości kamienia, mierząc stałą czasową układu oraz korzystając z odpowiednio eksperymentalnie przygotowanych wykresów zależności grubości osadu i stałej czasowej. Ten pomiar jest wykonywany sporadycznie, a wartość wyniku jest zapamiętywana w urządzeniu. Dynamika zmian grubości warstwy osadu jest znikoma, w związku z tym pomiar w cyklu tygodniowym lub nawet miesięcznym jest wystarczający. Schemat cyklu pomiarowego jest pokazany na rysunku 8.4. Grubość warstwy osadu jest wyznaczana w zastępczej jednostce zdefiniowanej jako  $K/W$ , co właściwie określa izolacyjność cieplną. Zależność grubości osadu i izolacyjności musi być wyznaczona eksperymentalnie. W kroku (3), znając grubość osadu, sięgamy do zależności stałej czasowej od prędkości strumienia wody przepływającej (rys. 8.4). Na podstawie tej zależności wyznaczamy strumień przepływającej wody. Kolejne kroki prowadzące do wyznaczenia wartości przepływu można przedstawić następująco:

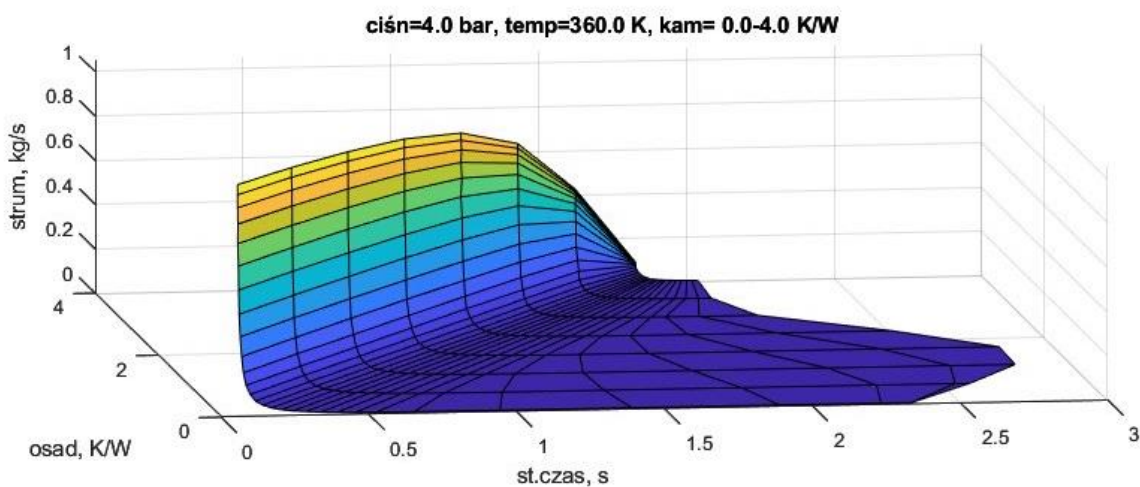
1. Wykonujemy test czy w rurociągu znajduje się woda, której przepływ został wstrzymany. Mierzone są temperatura oraz ciśnienie wody. Wymuszony zostaje wzrost temperatury czujnika temperatury.
2. Na podstawie zmierzonej stałej czasowej wyznaczona zostaje grubość warstwy osadu.
3. Przepływ wody zostaje wznowiony, ponownie wymuszony zostaje wzrost temperatury termoelementu.
4. Znane są właściwości wody (temperatura oraz ciśnienie są stale mierzone).
5. Mierzona jest stała czasowa PCP uzyskania w trakcie przepływu.
6. Na podstawie skatalogowanych danych, znając grubość kamienia oraz pomiaru stałej czasowej schładzania PCP dla danej temperatury i ciśnienia wody wyznaczamy strumień przepływu.

Na rysunku 8.6 przedstawiono stałe czasowe dla różnych grubości osadu przy różnych wartościach ciśnień, natomiast na rysunku 8.7 przedstawiono stałe czasowe zależne od strumienia przepływu oraz grubości osadu.



Rys. 8.6. Stałe czasowe dla różnych grubości osadu wyrażonego w K/W

Fig. 8.6. Time constants for different sediment thicknesses expressed in K/W



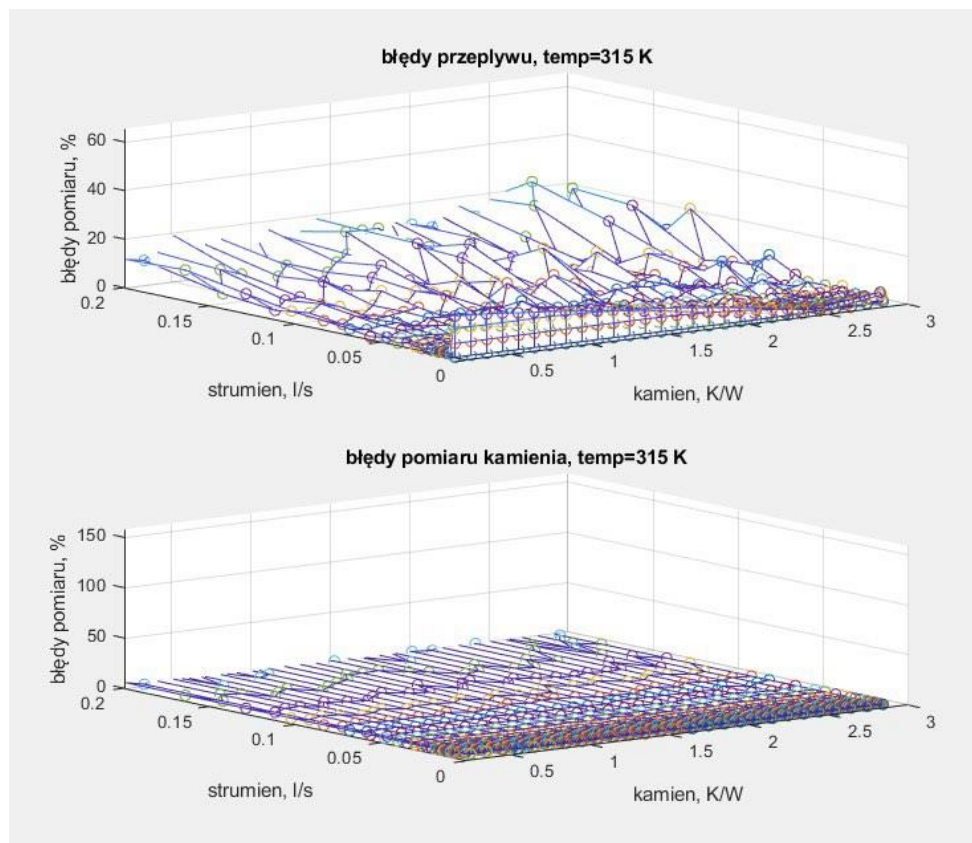
Rys. 8.7. Charakterystyka zależności stałych czasowych od strumienia przepływu oraz grubości osadu kamiennego

Fig. 8.7. Characteristics of the dependence of time constants on flow rate and scale deposit thickness

Rysunek 8.7 prezentuje w zasadzie końcowy wynik, który odczytuje się znając poziom osadu i mierząc stałą czasową osiągnięcia przez PCP temperatury wody przepływającej w kanale.

## **8.4. Analiza błędów wyznaczania wartości grubości osadu oraz strumienia przepływu**

Przygotowano model oraz program do obliczania błędów interpolacji wynikających z konieczności wyznaczania wartości pośrednich grubości osadu oraz przepływu na podstawie skatalogowanych charakterystyk. Przykładowe wielkości procentowe błędów dla wybranych skatalogowanych charakterystyk dla różnych ilości charakterystyk przedstawiono na rysunku 8.8.



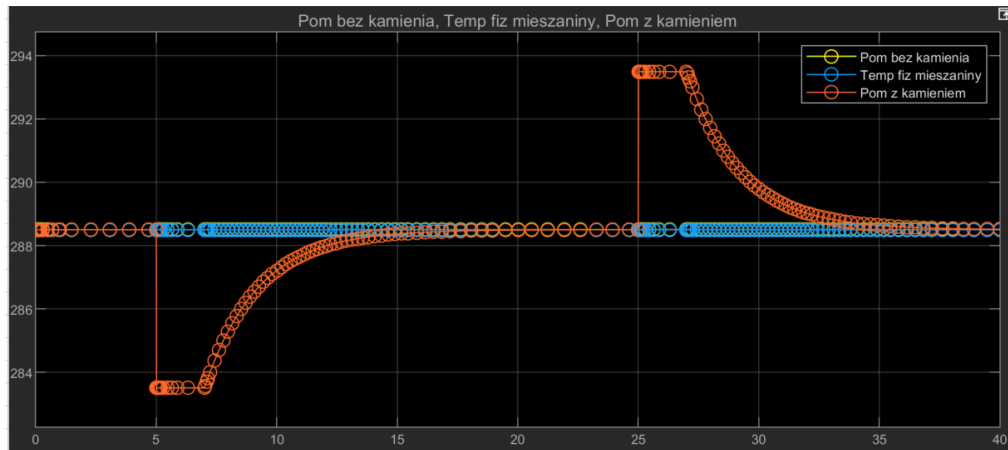
Rys. 8.8. Charakterystyka błędów pomiaru grubości osadu oraz przepływu wynikające interpolacji

Fig. 8.8. Characteristics of errors in sediment thickness and flow measurement resulting from interpolation

Z rysunku wynika, że zastosowany algorytm jest wrażliwy na liczbę dostępnych charakterystyk. Błąd pomiaru można ograniczyć poprzez wyznaczenie większej ilości charakterystyk. Charakterystyki będące wynikiem pomiarów wykazują przebieg tożsamy jakościowo i bardzo zbliżony ilościowo z modelem numerycznym.

Model przygotowany w systemie MatLab-Simulink zwalidowano pomiarami wykonanymi na stanowisku badawczym. Ze względu na brak możliwości zastosowania czujnika o konstrukcji docelowej, wykonano pomiary na zastępczym modelu o zdecydowanie

większej masie. Miało to na celu wydłużenie czasu pomiaru na tyle, aby za pomocą dostępnego oprzyrządowania wiarygodnie zarejestrować przebiegi czasowe. Po takiej kalibracji modelu przyjęto masę czujnika o wartości zakładanej w konstrukcji docelowej i przeprowadzono badania modelowe. Założony strumień (0.27 kg/s), stałą czasową odczytaną z wykresu (2.5 s), stałą czasową odczytaną z pomiaru (2.6 s) pokazano na rysunku 8.9.

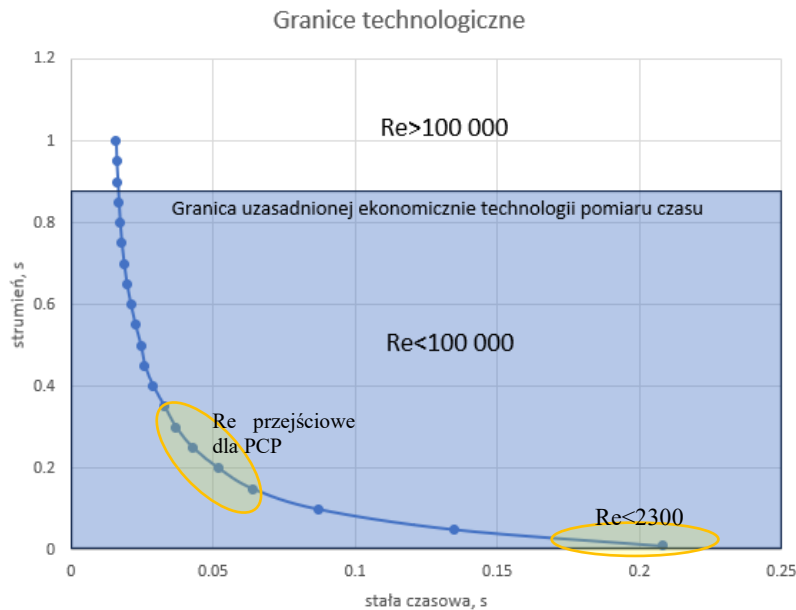


Rys. 8.9. Założony strumień, stała czasowa odczytana z wykresu, stała czasowa odczytana z pomiaru  
Fig. 8.9. Assumed flux, time constant read from the graph, time constant read from the measurement

Założono, że na tym etapie analiz taka zgodność jest wystarczająca i model MatLab-Simscape może być wykorzystywany w dalszych badaniach.

## 8.5. Optymalizacja, wnioski i wytyczne konstrukcyjne

Pierwszy wniosek konstrukcyjny dotyczy granicy optymalnej z techniczno-ekonomicznego punktu widzenia obejmującej maksymalny możliwy zakres pomiarowy. Podstawową trudnością jest tu pomiar krótkiego odcinka czasu dla dużych strumieni. W celu analizy tego zagadnienia wykonano obliczenia modelem numerycznym Ansys-CFX w szerokim zakresie zmian liczb Reynoldsa. Uzyskane rezultaty przedstawiono na rysunku 8.10.



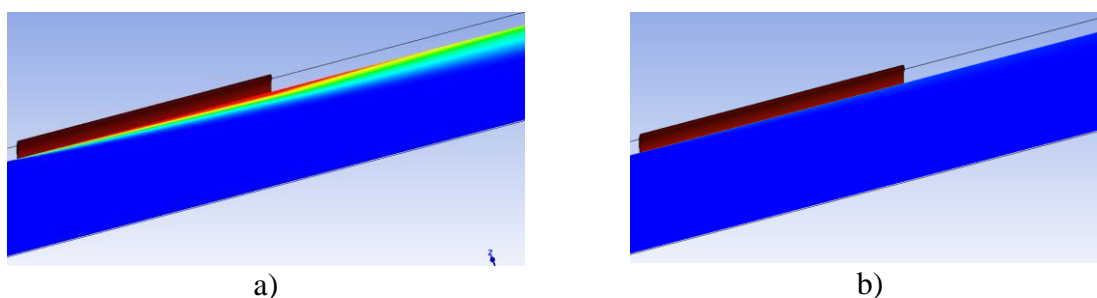
Rys. 8.10. Charakterystyka pokazująca granice technologiczne dla liczby Reynoldsa

Fig. 8.10. Characteristics showing technological limits for Reynolds number

Granica optymalności ekonomicznej jest związana z ekonomicznie uzasadnionym systemem pomiaru czasu. Dostępne na rynku i ekonomicznie atrakcyjne komponenty umożliwiają pomiar czasu z dobrą rozdzielczością do tysięcznych części sekundy. Zakłada się więc, że graniczna liczba Reynoldsa to około 100 000. Powyżej tej granicy pomiar stanie się znacznie trudniejszy, a dokładność mniejsza. Końcowy dobór parametrów optymalnych jest wynikiem kompromisu pomiędzy czasem pomiaru a trudnościami w uzyskaniu odpowiedniej rozdzielczości i kosztem wytworzenia urządzenia.

Z danych obliczeniowych z modelu numerycznego, jak również z oceny profilu prędkości, wynika że proces nagrzewania PCP zaburza pierwszą fazę pomiarową (rys 8.11). Woda w warstwie przyściennej ma temperaturę czujnika po procesie nagrzewania (a więc wyższą) i warunki chłodzenia są inne niż ma to miejsce w dalszym czasie. Stąd wniosek, że długość czujnika nie powinna być duża, a czas nagrzewania nie ma właściwie znaczenia. Jest to związane z tym, że proces nagrzewania odbywa się na całej długości PCP, a tylko woda na długości pierścienia pomiarowego bierze udział w wymianie ciepła. Dłuższy czas nagrzewania niczego tu nie zmienia bo nagrany obszar wypływa z PCP i nie bierze już udziału w wymianie ciepła. Istotny jest natomiast ten czas „wypływania”, który zależy od aktualnego strumienia. Stąd wskazówka, że im większy będzie strumień, tym mniejszy jest niekorzystny wpływ procesu nagrzewania.

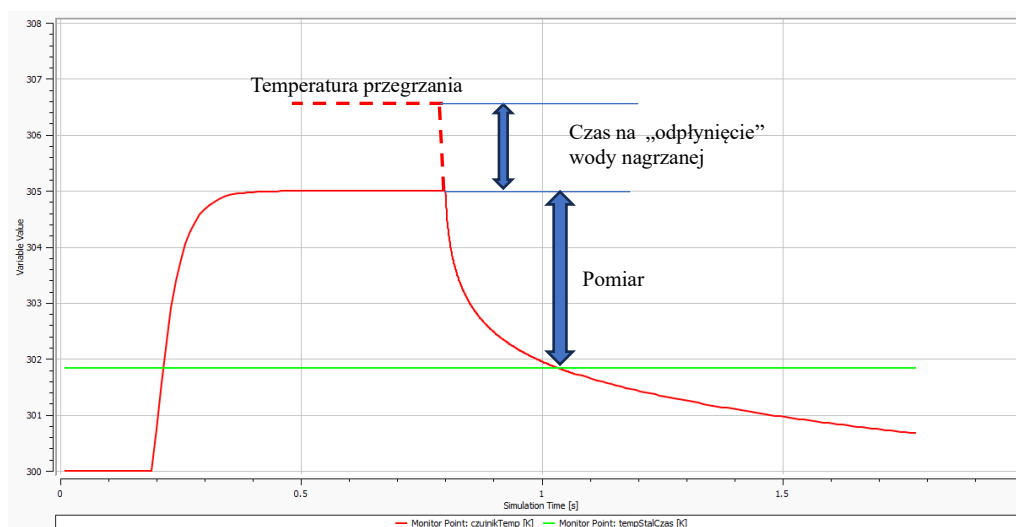
Ta analiza prowadzi do jeszcze jednego wniosku konstrukcyjnego, dotyczącego algorytmu pomiaru, jak również samej metodyki modelowania. Ten wniosek dotyczy oceny, czy istnieje sposób uniknięcia niekorzystnego oddziaływania procesu nagrzewania. Rozwiązaniem tego problemu wydaje się pomiar czasu nie od temperatury końcowej procesu nagrzewania, ale od temperatury nieco niższej. Tę temperaturę uzyska czujnik w czasie niezbędnym do „wypłynięcia” nagrzanej wody z obszaru pierścienia pomiarowego. Inaczej można powiedzieć, że czujnik należy przegrzać powyżej zakładanej różnicy temperatur, a pomiar rozpocząć gdy temperatura pierścienia uzyska założoną na wstępie różnicę pomiarową. Ilustruje to rysunek 8.11.



Rys. 8.11. Charakterystyka początkowego rozkładu temperatury: a) negatywny wpływ procesu nagrzewania, b) brak wpływu procesu nagrzewania

Fig. 8.11. Characteristics of initial temperature distribution: a) negative impact of the heating process, b) no influence of the heating process

Wynika stąd również wniosek związany z procesem modelowania, aby uzyskać pomiar z modelu unikając jednocześnie wpływu procesu nagrzewania, to należy wyłączyć w tym czasie wymianę ciepła z domeną wody. Na rysunku 8.12 przedstawiono moment przegrzania czujnika.



Rys. 8.12. Charakterystyka przegrzania czujnika

Fig. 8.12. Characteristics of sensor overheating

## **8.6. Konstrukcja czujnika w przepływomierzu**

W ramach pracy zaproponowano dedykowaną konstrukcję przepływomierza uwzględniającą założone wymogi i cechy urządzenia. Wybór technologii wykonania urządzenia wykracza poza zakres tej pracy, przyjęto więc rozwiązanie prawdopodobne, jednakże bez dalszej argumentacji wyboru. Założono, że czujnik oporowy zatopiony zostanie w elemencie szklanym lub z żywicy syntetycznej. W celu zapewnienia lepszej izolacyjności cieplnej względem parametrów otoczenia czujnik osłonięty jest z zewnątrz kapilarami próżniowymi. Materiałem izolacyjnym może być np. specjalnie dobrany szamot lub odpowiednie szkło.

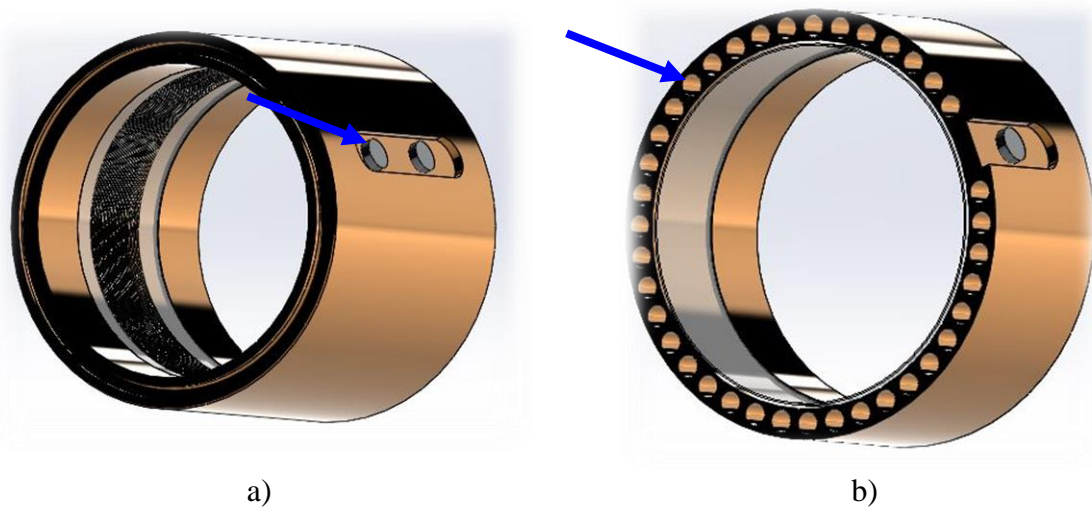
Zakres dopuszczalnych temperatur pracy dla szkła, w zależności od jego typu, może wynosić od  $-196^{\circ}\text{C}$  do  $+350^{\circ}\text{C}$  (szkło miękkie) lub od  $20^{\circ}\text{C}$  do  $450^{\circ}\text{C}$  (szkło hartowane). Jako materiał samego czujnika rezystancyjnego proponuje się drut platynowy o bifilarnym kształcie wtopiony w szkło osłaniające. Rodzaj szkła należy tak dobrać, aby zminimalizować skłonność do występowania histerezy [143]. Rezystory, które wykonane są ze szkła miękkiego, nie wykazują takiej skłonności. Platyna i szkło miękkie mają podobną rozszerzalność cieplną.

Histeresa jest zazwyczaj wynikiem efektów termicznych lub mechanicznych w materiale. Może to być spowodowane opóźnionym dostosowaniem się materiału do zmian temperatury lub naprężeniami wewnętrznymi, które powstają podczas powtarzających się cykli zmiany temperatury. Histeresa może wpływać na dokładność pomiarów i stabilność układów, dlatego jest ważnym aspektem, który należy brać pod uwagę. Jednakże zakres temperatur, który jest przewidywany w pomiarach przepływu wody, nie powinien wpłynąć na histerezę w przypadku wykonania czujnika ze szkła miękkiego, czy też hartowanego [144], [145], [146]. Wykonany czujnik powinien być również niewrażliwy na oscylacje, czy wibracje.

Na rysunku 8.13a przedstawiono konstrukcję czujnika. Przekrój pionowy przedstawiono na rysunku 8.13b, natomiast przekrój poprzeczny na rysunku 8.14a. W przekroju poprzecznym zaznaczono kapilary, w których znajduje się przestrzeń do wypełnienia, w celu polepszenia właściwości izolujących czujnika. Konstrukcja w środku jest idealnie równa, geometria jest niezachwiana. Na rysunku 8.15a przedstawiono element czynny rezystora. Zaznaczono również miejsce wyprowadzenia elementów czynnych, czyli wyprowadzenie połączeń, co przedstawiono na rysunku 8.15b. W przepływomierzu uwzględniono również miejsce na uszczelkę. Na rysunku 8.14b przedstawiono element czynny zatopiony w szkło miękkim.

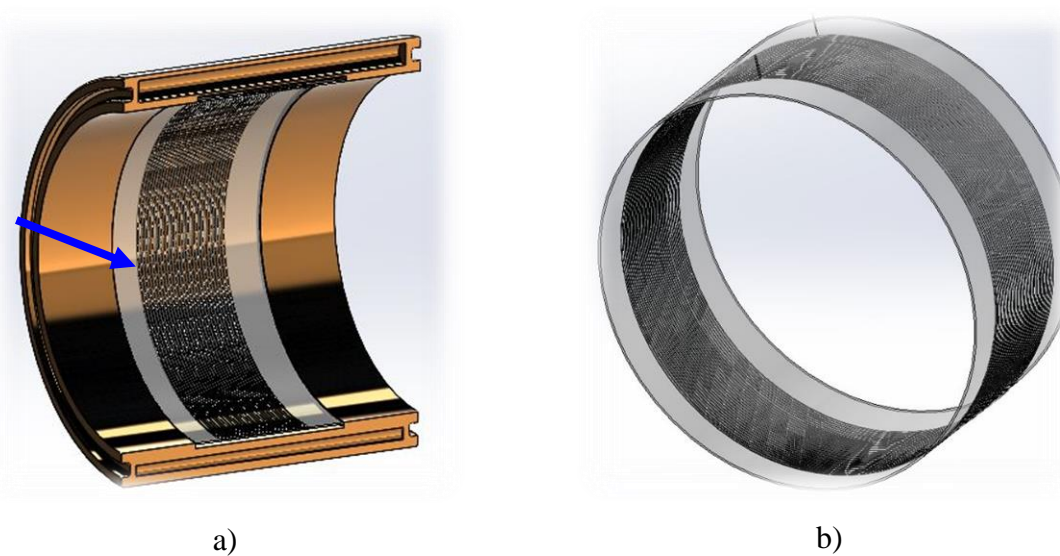


Wybrano szkło miękkie zamiast szkła hartowanego ze względu na jego szerszy zakres temperatur, w którym można wykonać pomiar.



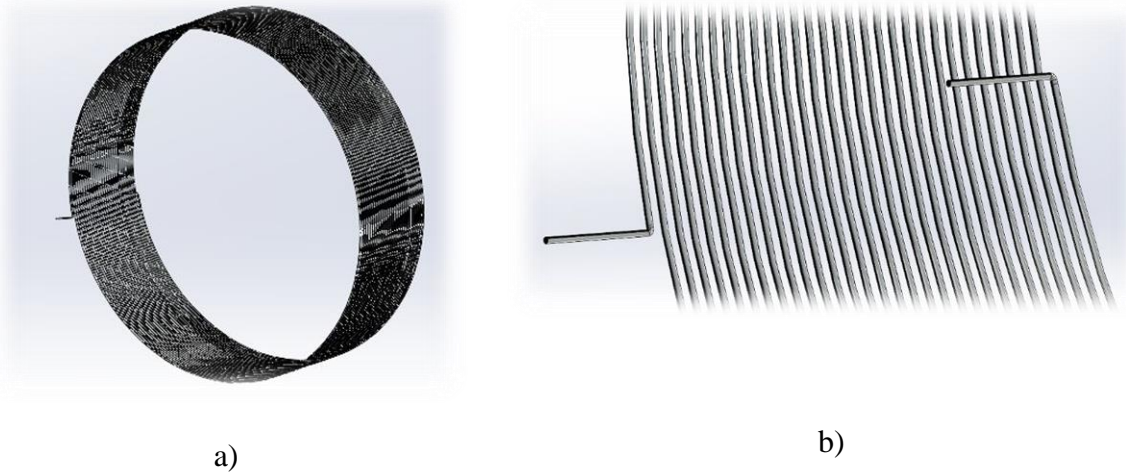
Rys. 8.13. Model 3D PCP: a) konstrukcja czujnika z izolacją termiczną i wyprowadzeniem połączeń elektrycznych czujnika, b) przekrój poprzeczny czujnika, z widocznymi kapilarami

Fig. 8.13. 3D PCP model: a) sensor design with thermal insulation and sensor electrical connections routing, b) sensor cross-section, with capillaries visible



Rys. 8.14. Model 3D PCP: a) przekrój wzdłużny czujnika z widocznym drutem platynowym wtopionym w szkło i gniazdo uszczelnienia hydraulicznego, b) element czynny zatopiony w szkło miękkim – czujnik

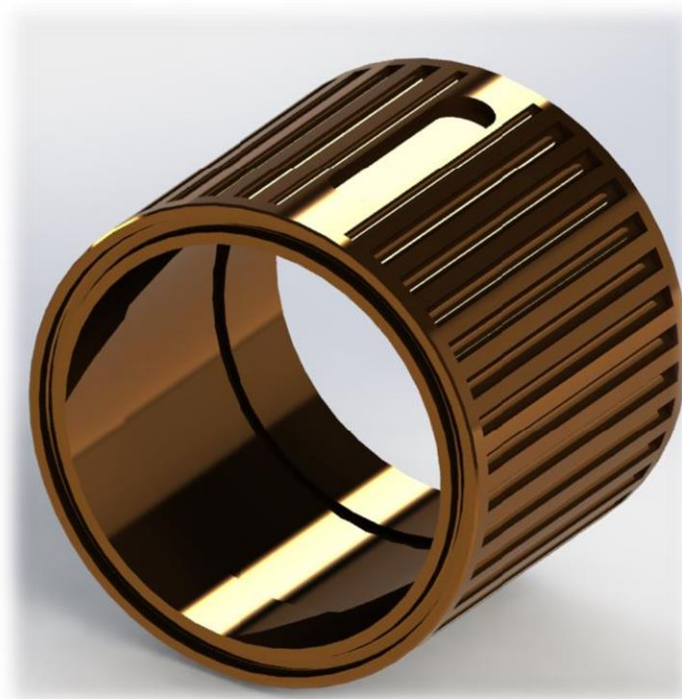
Fig. 8.14. 3D model of PCP: a) longitudinal cross-section of sensor with visible platinum wire embedded in glass and hydraulic seal seat, b) active element embedded in soft glass - sensor



Rys. 8.15. Model 3D elementu aktywnego (rezystor drutowy) - drut platynowy w kształcie bifilarnym: a) cały rezystor, b) wyjścia czynne

Fig. 8.15. 3D model of active element (wirewound resistor) - bifilar platinum wire: a) the entire resistor, b) active outputs

Na rysunku 8.16 przedstawiono inny możliwy wygląd zewnętrzny czujnika, który minimalizuje zużycie materiału izolującego.

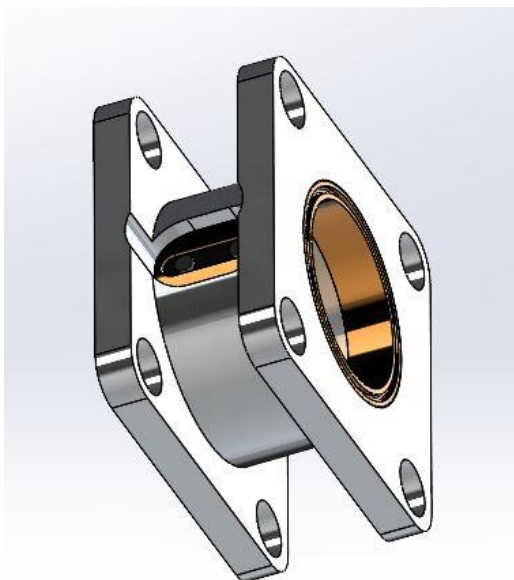


Rys. 8.16. Model 3D izolatora termicznego (obudowa zewnętrzna z rowkami)

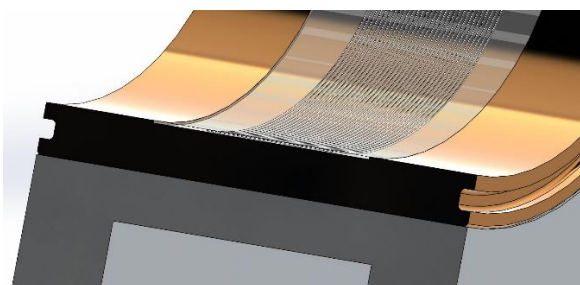
Fig. 8.16. 3D model of thermal insulator (outer casing with grooves)

Czujnik umiejscowiony jest pomiędzy dwoma elementami mocującymi ze specjalnie przygotowanymi otworami celem dopasowania go do rurociągu lub kanału, w którym odbywać

ma się pomiar. Rysunek 8.17 a przedstawia całe urządzenie z miejscem mocowania. Na rysunku widoczne jest również miejsce na uszczelkę. Uszczelka umiejscowiona jest poza czujnikiem dzięki czemu pomiar będzie bardziej precyzyjny, co przedstawia rysunek 8.17 b.



a)



b)

Rys. 8.17. Model 3D urządzenia: a) widok w całości, b) przekrój (zachowana geometria kanału przepływowego)

Fig. 8.17. 3D model of the device: a) full view, b) cross-section (the preserved geometry of the flow channel)

## **9. Analiza potencjalnych błędów pomiarowych**

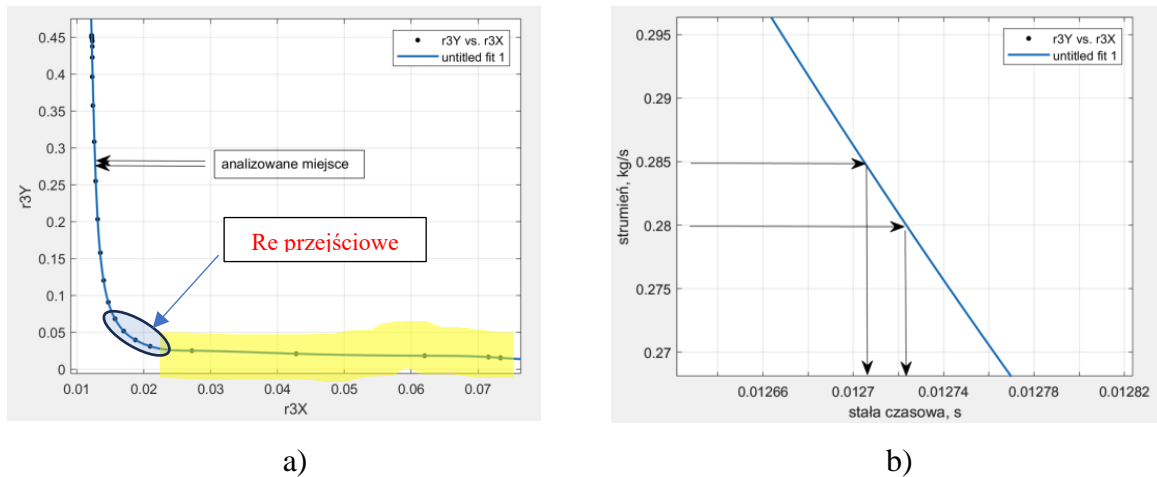
Błędy pomiarowe będą szczegółowo analizowane dla wersji docelowej przyrządu, na obecnym etapie przeprowadzono dyskusję w wybranych najbardziej istotnych aspektach. Można tu wymienić następujące kategorie:

- 1) błąd popełniany przy badaniach laboratoryjnych związany z pomiarem stałej czasowej czujnika temperatury. Należy zwrócić uwagę, że w przyjętej koncepcji pomiaru, mierzymy wskazania czujnika temperatury, ale ostatecznym wynikiem pomiaru jest stała czasowa mierzona w jednostkach czasu,
- 2) błąd czujnika pomiarowego powstały w czasie pomiaru wynikający z klasy pomiarowej zastosowanego czujnika temperatury,
- 3) błędy obliczeniowe i interpolacyjne związane z algorytmami pomiaru grubości osadu kamiennego,
- 4) błąd wynikający z uproszczenia metody pomiarowej polegającej np. na założeniu, że osad kamienny w kanale przepływowym zmniejsza jego pole przekroju w sposób jednakowy w każdym przekroju, czyli osadza się równomiernie.

Szczegółowa analiza wszystkich tych błędów nie jest możliwa na aktualnym etapie rozwoju urządzenia i zaawansowania pracy. Badania te mogą zostać wykonane po zbudowaniu przyrządu prototypowego, którego konstrukcja nie będzie odbiegała od wersji docelowej. Błędem końcowym i ostateczną weryfikacją będzie pomiar przepływu względem przyrządu wzorcowego, niezależnie od tego, jakie błędy cząstkowe mają na niego wpływ. Błąd ten, przynajmniej na tym poziomie rozwoju urządzenia, może być stosunkowo duży.

### **9.1. Wpływ dokładności pomiaru czasu**

Rozpatrując potencjalne błędy pomiarowe, które popełnimy się przy tych pomiarach, trudno nie zauważyć silnej nieliniowości charakterystyki przyrządu i jej wpływu na dokładność. Zarówno wykonane badania eksperymentalne, jak i zgodne z nimi obliczenia numeryczne potwierdzają taką charakterystykę (rys 9.1).



Rys. 9.1. Wybrana charakterystyka przyrządu z widoczną silną nieliniowością

Fig. 9.1. Selected device characteristics with visible strong nonlinearity

Charakterystyka w zakresie strumieni poniżej 0.05 kg/s, ogólniej dla liczb Reynoldsa poniżej krytycznych (obszar zaznaczony żółtym kolorem), wydaje się korzystna ze względu na błędy pomiarowe. Nawet stosunkowo mało dokładnie zmierzona stała czasowa nie powoduje dużego błędu odczytu przepływu. Jednak pomiar powyżej tej granicy, powyżej krytycznej liczby Reynoldsa, wydaje się niezwykle trudny. Analizując wybrane miejsca na charakterystyce, np. w zakresie 0.280 do 0.285 kg/s (rys 9.1a) można zauważyć, że przebieg charakterystyki jest prawie pionowy, co by mogło oznaczać brak możliwości pomiaru. Czy tak jest naprawdę możemy sprawdzić na powiększeniu tego fragmentu (rys 9.1b). Zauważalna zmiana strumienia na poziomie 0.28 kg/s o 0.005 kg/s (około 0.3 litra na minutę) wywołuje zmianę stałej czasowej o zaledwie 0.00002 s (rys 9.1b). W typowych dotychczasowych rozwiązaniach taka zmiana jest nierejestrowalna. Rozpatrywana konstrukcja zakłada jednak sięgnięcie po współczesną technologię. Czy metoda będzie mogła być stosowana do pomiaru w niekorzystnym obszarze charakterystyki, powyżej krytycznej liczby Reynoldsa, właściwie sprowadza się do pytania o pomiar czasu w tym przedziale. Precyzyjniej się wyrażając, należy określić, czy można zmierzyć różnicę czasową na poziomie 0.00002 s z odpowiednią rozdzielczością gdyż dużo bardziej istotna jest tutaj rozdzielczość niż dokładność pomiaru, co jest dużym ułatwieniem. Odpowiedzi na to pytanie można poszukać w rozwiązaniach stosowanych np. w smartfonach. Powszechnie znanym systemem bazującym na dokładnym pomiarze czasu jest system GPS. Czas jest tam mierzony z dokładnością (nie rozdzielczością) na poziomie  $10^{-10}$  s. Proponowane rozwiązanie przepływomierza wymaga pomiaru czasu z rozdzielczością o pięć rzędów niższą. Tego typu technologia jest dostępna i ekonomicznie atrakcyjna.

Odnosząc się do sposobu pomiaru tak krótkich odcinków czasu, to najwygodniej jest użyć do tego celu system przerwań mikroprocesorów, gdzie okresy wywoływania przerwań niemaskowalnych można uzyskiwać na poziomie 100 ns<sup>4</sup>. Czyli przerwanie można wywołać co 0.0000001 sekundy (10<sup>-7</sup>). Dzieląc rozpatrywany czas z przykładu powyżej 2•10<sup>-5</sup> przez 1•10<sup>-7</sup> otrzymujemy 200 przerwań w czasie gdy przepływ zmieni się o 0.3 l/s. Jest to rozdzielczość aż zanadto zadawalająca. W tym miejscu należy również zasygnalizować pewien złożony problem optymalizacji techniczno-ekonomicznej. Istota tego problemu sprowadza się do określenia minimalnych kosztów zakupu komponentów do budowy przepływomierza, gdzie głównymi składnikami kosztów są odpowiedni mikroprocesor pozwalający na osiągnięcie niezbędnej częstości przerwań (rozdzielczości pomiaru) oraz masa czujnika platynowego. Szybszy (droższy) procesor pozwala na pomiar krótszych czasów reakcji a więc zmniejszenie masy (kosztu) czujnika, to z kolei obniża koszt całości. Wolniejszy procesor (tańszy) to mniejsza rozdzielczość pomiaru i aby uzyskać minimalną założoną rozdzielczość to należy zwiększyć stałą czasową a to wymaga większej masy czujnika, czyli więcej kosztownej platyny. Dłuższy czas pomiaru to również większe uśrednienie wyniku. Ograniczeniami w takim procesie optymalizacyjnym są maksymalny założony czas pomiaru oraz założona rozdzielczość. Należy zauważyć, że wraz z zmniejszaniem się liczby Reynoldsa, te wymagania maleją i wydłuża się czas pomiaru (rys 9.1). Nie usuwa to jednak problemu optymalizacyjnego, a jedynie przesuwa na inne zakresy parametrów.

Uwagi dotyczące systemu elektronicznego zapewniającego taki pomiar wychodzą jednak poza zakres tej pracy i nie będą dalej omawiane. Warto również wspomnieć, że czas pomiaru można dowolnie wydłużyć zwiększając masę czujnika. Wpływać to jednak będzie na czas uśrednienia i koszt urządzenia. Dokładniejsza analiza zależności pomiędzy czasem pomiaru, wartością mierzonego strumienia i konstrukcją, a dokładniej długością czujnika, dostarcza również innych ważnych wskazówek związanych z optymalnością konstrukcji przepływomierza gdy funkcją celu jest poprawa dokładności pomiaru, zmiennymi decyzyjnymi długość i masa czujnika, a ograniczeniami założone zakresy parametrów. Ilustrację zagadnienia pokazano na rysunku 9.2.

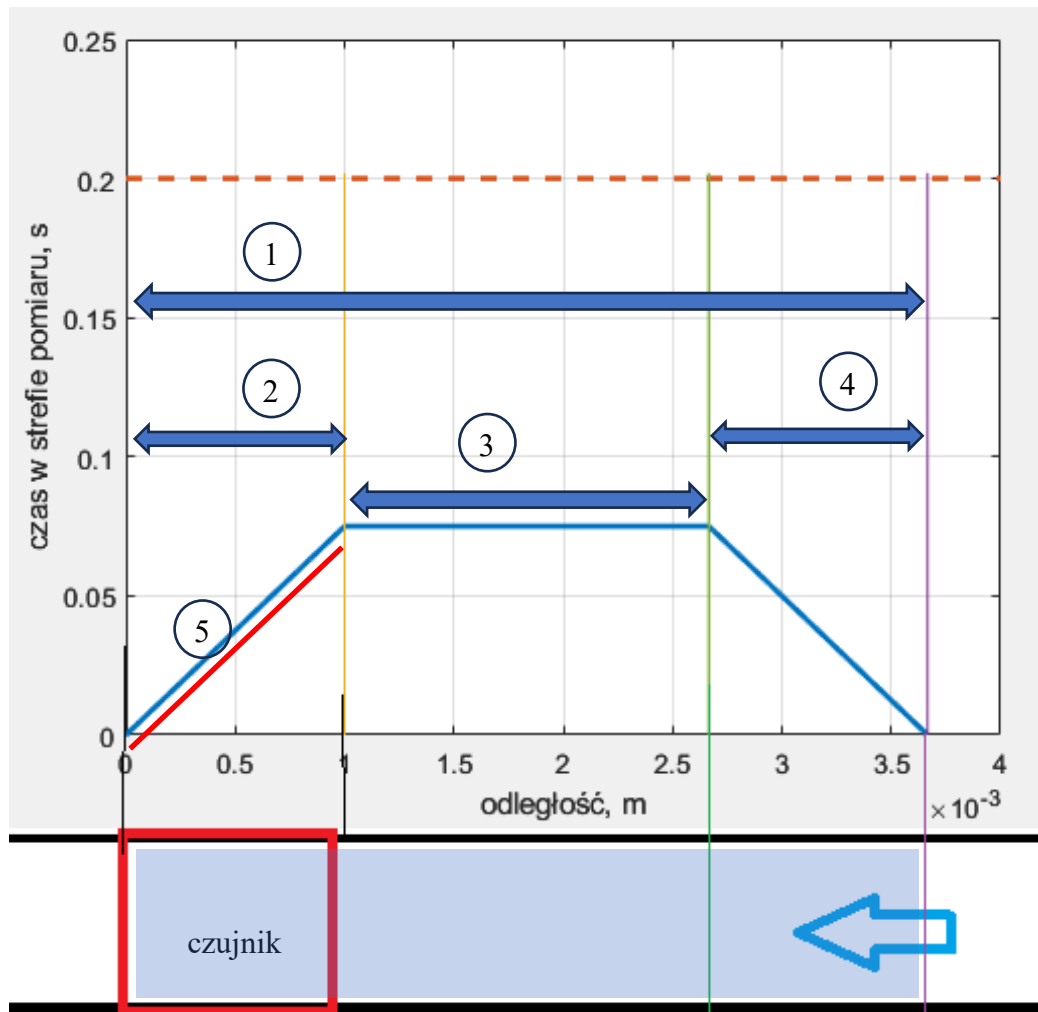
---

<sup>4</sup> Np. Procesor STM32F730Z8T6TR to mikrokontroler firmy STMicroelectronics z rdzeniem Arm® Cortex®-M7 [151]

## **9.2. Błąd nadmiernej długości drogi pomiarowej**

Błąd ten jest związany z analizą drogi jaką przebywa wydzielona porcja wody w czasie jednego cyklu pomiarowego. Załóżmy dla ułatwienia rozważań, że rozpatrujemy prostokątny profil prędkości. Dla danej prędkości przepływu i danej długości części pomiarowej można wyznaczyć fragmenty strumienia które w różny sposób będą oddziaływały z czujnikiem (rys. 9.2):

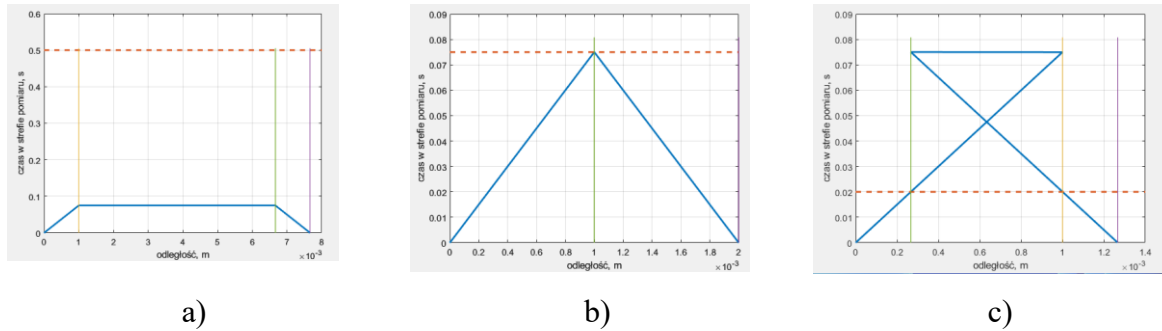
- 1) fragment strumienia biorący udział w pomiarze, tylko ta porcja wody będzie oddziaływała na czujnik, parametry pozostałej części strumienia nie są istotne dla pomiaru, strefa (1),
- 2) fragment strumienia który w czasie rozpoczęcia pomiaru znajdował się w objętości wyznaczonej przez pierścień czujnika. Te porcje wody ze stałą prędkością będą opuszczały strefę pomiaru. Przy czym jako ostatnia opuści tą strefę porcja wody która w chwili rozpoczęcia pomiaru była w przekroju wlotowym, porcje poprzednie przebywają w strefie pomiaru z coraz krótszym czasem, linia (5) w strefie (2),
- 3) fragment strumienia który w chwili rozpoczęcia pomiaru był przed wlotem do czujnika w chwili zakończenia pomiaru opuścił już czujnik, strefa (3),
- 4) fragment strumienia który w czasie pomiaru zdążył osiągnąć strefę czujnika, ale w chwili zakończenia pomiaru pozostawał wewnątrz strefy pomiarowej (4).



Rys. 9.2. Analiza optymalizacji czasu pomiaru oraz długości i masy czujnika; (1) całkowita długość strumienia biorąca udział w pomiarze, (2) strumień wewnątrz pierścienia pomiarowego, (3) strumień którego czas przebywania w strefie pomiaru jest stały, (4) strumień który w chwili zakończenia pomiaru będzie się znajdował wewnątrz czujnika, (5) wpływ nagrzewania na stałą czasową

Fig. 9.2. Analysis of the optimization of the measurement time and the length and mass of the sensor; (1) the total length of the stream involved in the measurement, (2) the stream inside the measuring ring, (3) the stream whose stay time in the measurement zone is constant, (4) the stream that will be located at the end of the measurement inside the sensor, (5) the influence of heating on the time constant

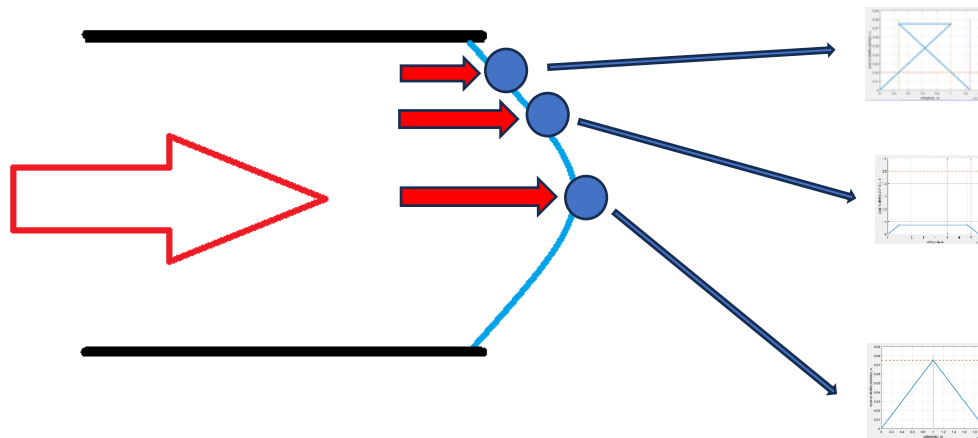




Rys. 9.3. a) Parametry dobrane optymalnie, dominująca część strumienia znajduje się identyczny czas w strefie pomiaru, minimalne oddziaływanie fazy nagrzewania; b) parametry graniczne gdzie strumień w czasie pomiaru przesunie się o długość czujnika; c) niekorzystne parametry gdy strumień nie opuści strefy pomiaru, wówczas niekorzystnie wpływa proces nagrzewania (pierwsza faza pomiaru) na wynik

Fig. 9.3. a) Parameters selected optimally, the dominant part of the stream stays in the measurement zone for the same time, minimal impact of the heating phase; b) limit parameters where the stream will shift by the length of the sensor during the measurement; c) unfavorable parameters when the stream does not leave the measurement zone, then the heating process (first phase of measurement) has an unfavorable impact on the result

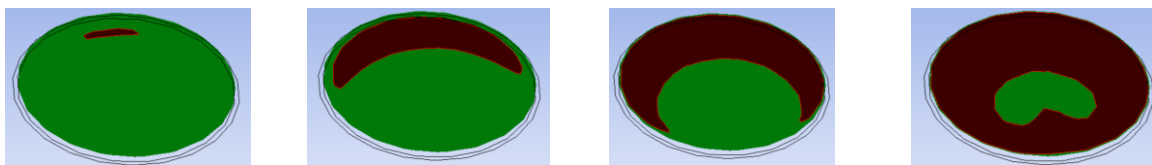
Przedstawiona powyżej analiza dla całego rurociągu jest nadal dużym uproszczeniem gdyż korzysta z założenia, że profil prędkości jest prostokątny (rys. 9.3). Rzeczywisty profil prędkości będzie zbliżony do prostokątnego dla liczb  $Re$  powyżej wartości krytycznej. W przypadku proponowanego rozwiązania przepływomierza występują jednak zarówno przepływy turbulenty jak i laminarne. Dlatego też dużo bardziej prawdopodobna wydaje się sytuacja jak na rysunku poniżej gdzie występują wszystkie przypadki jednocześnie (rys. 9.4). Jeszcze bardziej złożona jest sytuacja gdy profil prędkości nie będzie symetryczny, np. za kolankiem zmieniającym kierunek strugi. Wniosek jest z tego następujący, im krótszy jest czujnik tym bardziej przewidywalny jest mechanizm oddziaływania porcji wody na czujnik. W przypadku gdy w pierwszej fazie pomiarowej nagrzewany jest pierścień czujnika to nagrzana woda w strefie pomiarowej niepotrzebnie zaburza wynik pomiaru. Dlatego dąży się do sytuacji gdy większość cząstek zachowuje się tak jak pokazano na rysunku 9.2 strefa (3) oraz 9.3a.



Rys. 9.4. Profil prędkości przy przepływie laminarnym i prawdopodobne przypadki oddziaływania wyodrębnionej porcji wody na przepływomierz

Fig. 9.4. Velocity profile in laminar flow and probable cases of impact of a separated portion of water on the flowmeter

Na rys. 9.5 przedstawiono przekrój na wylocie z PCP. Kolorem zielonym zaznaczony obszary optymalnych prędkości pomiaru dla różnych wartości stałych czasowych. Asymetria wywołana jest deformacją profilu prędkości za kolankiem.



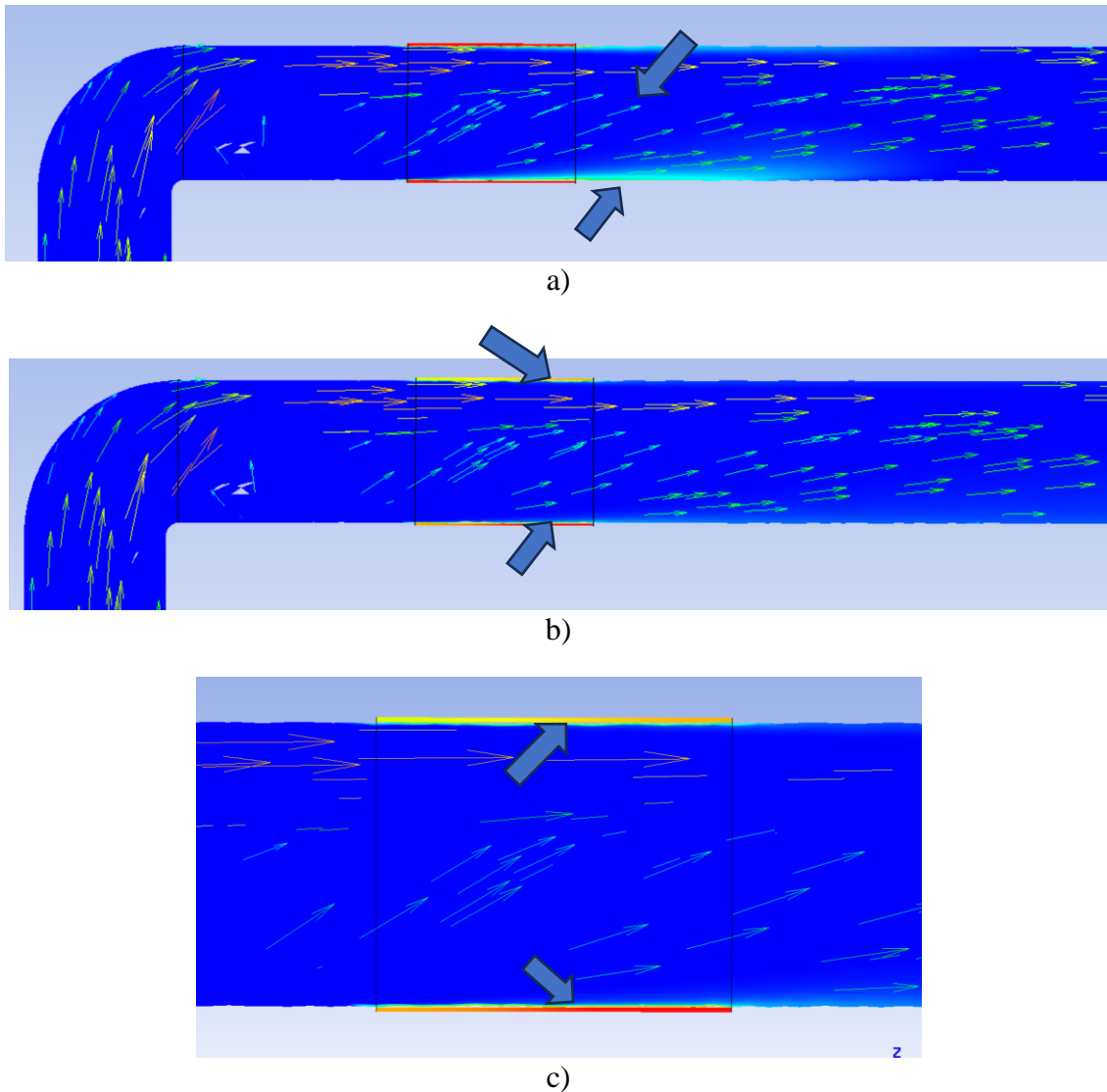
Rys. 9.5. Przekrój na wylocie z pierścienia pomiarowego, kolorem zielonym zaznaczono obszary optymalnych prędkości pomiaru dla różnych wartości stałej czasowej (asymetria wywołana deformacją profilu prędkości za kolankiem)

Fig. 9.5. Cross-section at the outlet from the measuring ring, areas of optimal measurement speeds for different values of the time constant are marked in green (asymmetry caused by deformation of the velocity profile behind the elbow)

### 9.3. Analiza wpływu miejsca zamontowania przepływomierza, model numeryczny

Zapewnienie prostoliniowego odcinka rurociągu przed miejscem montażu przepływomierza jest zwykle kluczowe ze względu na dokładność pomiaru. Dla bardzo wielu typów przepływomierzy zalecana długość równa jest około 5•średnica wewnętrzna rurociągu. Problem jest związany z całkowitym zaburzeniem profilu prędkości za kolankiem zmieniającym kierunek przepływu. Ilustruje to rysunek 9.6, widoczne jest znaczne zwiększenie

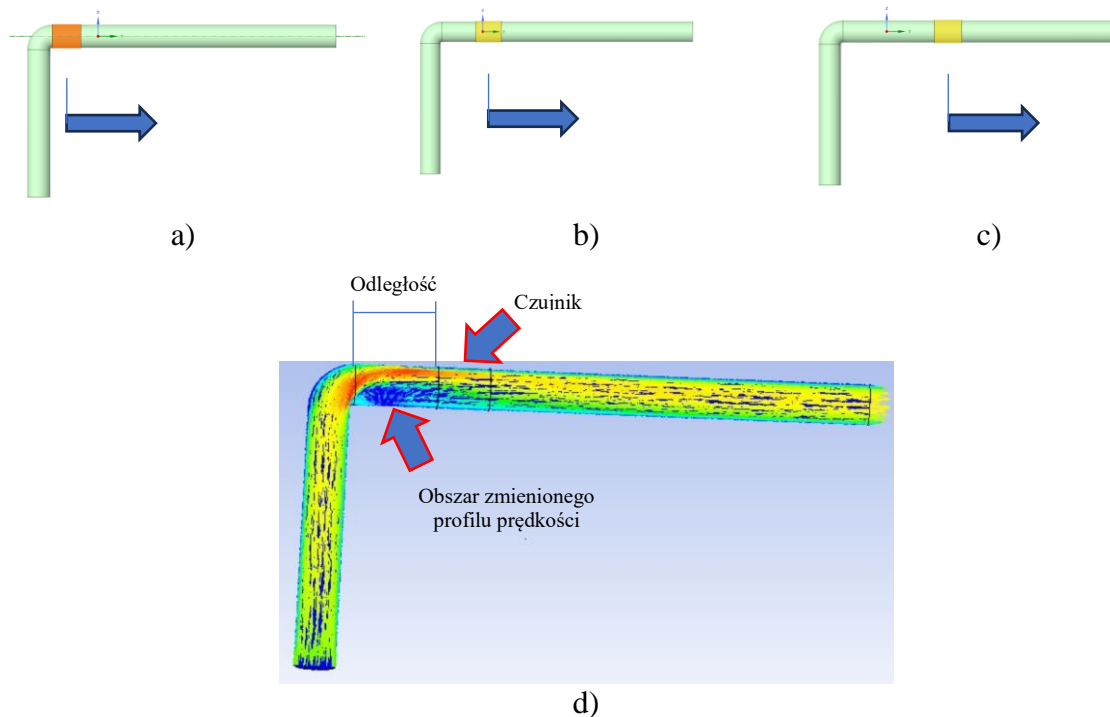
prędkości przepływu po stronie zewnętrznej łuku kolanka. Takie zaburzenie profilu wymaga wyrównania dlatego też stosowany jest odpowiednio długi odcinek prostoliniowy za kolankiem. W przypadku naszego rozwiązania pomiar odbywa się po całym obwodzie rury. W związku z tym poprawa chłodzenia z jednej strony pierścienia pomiarowego zawsze łączy się z jego pogorszeniem po drugiej stronie (rys 9.6). Przewiduje się więc, że nie spowoduje to aż takich wymagań odnośnie miejsca montażu, jak w tradycyjnych przepływomierzach.



Rys. 9.6. Asymetria rozkładu temperatury w przypadku montażu pierścienia pomiarowego za kolankiem  
Fig. 9.6. Asymmetry of temperature distribution when installing the measuring ring behind the elbow

Aby sprawdzić ten wpływ wykonano sparametryzowany model numeryczny kanału przepływowego gdzie parametrem jest odległość od kolanka zmieniającego kierunek przepływu (rys. 9.7), a wynikiem jest stała czasowa zmierzona dla identycznych parametrów przepływu. Model został sprawdzony ze względu na wpływ zarówno dyskretyzacji

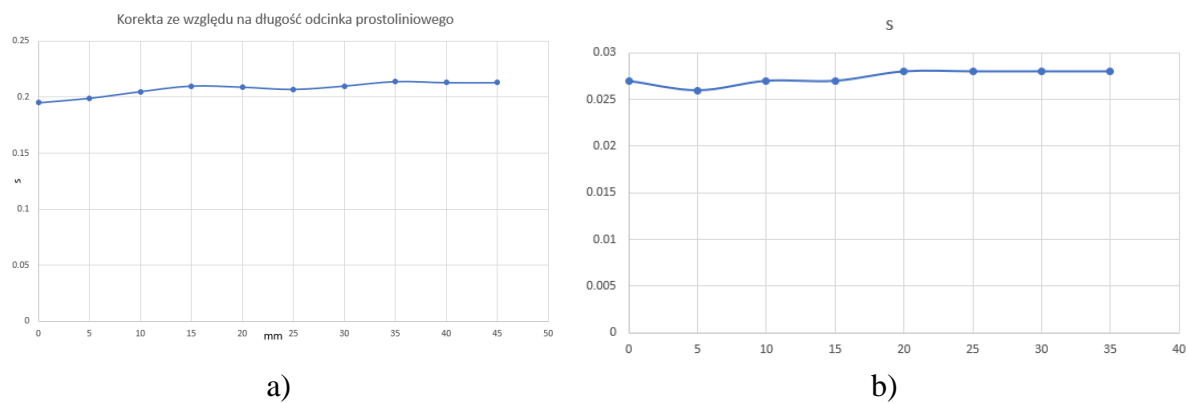
przestrzennej jak i czasowej. Zgodnie z przewidywaniem wpływ rodzaju i rozmiaru siatki nie jest aż tak istotny gdyż nie analizowany jest szczegółowy rozkład wartości temperatury w czujniku, a wartości temperatury średniej w całej objętości. Natomiast istotny jest wpływ kroku czasowego gdyż czas w tym przypadku mierzona jest ilość wykonanych kroków obliczeniowych. Z tego też względu powstaje błąd związany z nieciągłością takiego sposobu mierzenia czasu. Nie wpływa to jednakże na wynik w sposób jakościowy, a tylko ilościowy. Problem ten został przedstawiony w rozdziale dotyczącym doboru kroku czasowego obliczeń.



Rys. 9.7. Obszar zmienionego profilu prędkości

Fig. 9.7. Area of changed speed profile

Jak można zauważyć na rysunku 9.8 wpływ miejsca montażu przepływomierza za kolankiem jest niewielki jeżeli chodzi o wynik pomiaru. Symulacje przeprowadzono dla średnicy rurociągu równej 12 mm. Przebieg krzywej wskazuje, że nawet w przypadku montażu z zerową długością odcinka prostoliniowego stała czasowa jest niewiele krótsza od ustalonej dla dłuższych odcinków. Już dla 10 mm odcinka, mniej niż jedna średnica (12 mm), stała czasowa jest na poziomie stabilnym prawie identycznym jak dla większych odległości. Wynika stąd bardzo cenna własność proponowanego rozwiązania umożliwiająca skrócenie do minimum odcinków prostoliniowych. Taka cecha jest dużym ułatwieniem montażowym.



Rys. 9.8. Wpływ długości odcinka prostoliniowego na pomiar stałej czasowej, strumień: a) 0.01 kg/s, b) 0.3 kg/s

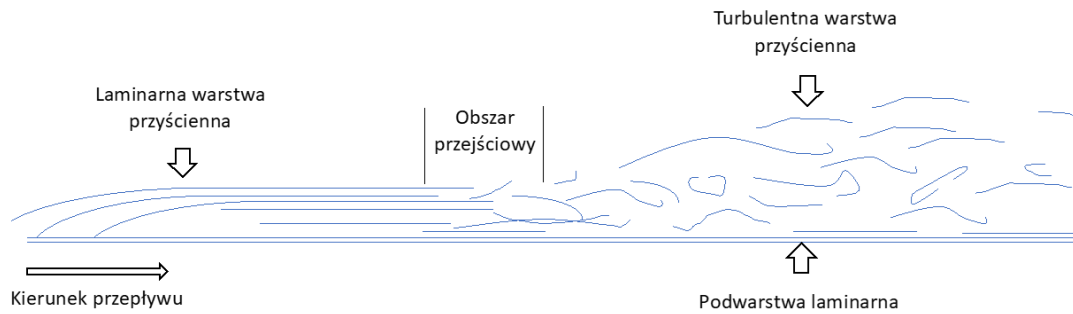
Fig. 9.8. The influence of the length of a straight line section on the measurement of the time constant, flux: a) 0.01 kg/s, b) 0.3 kg/s

## **10. Dyskusja osiągniętych celów pracy**

Celem ogólnym niniejszej pracy było wstępne opracowanie nowoczesnej konstrukcji urządzenia do pomiaru przepływu wody, wpisującego się w założenia Przemysłu 4.0 i Internetu rzeczy, zdolnego do wieloletniej pracy w trudnych warunkach pomiarowych uwzględniających wodę zakamienioną. W pracy przeanalizowano szereg potencjalnych możliwości konstrukcyjnych i wybrano możliwie optymalną zasadę działania dla sformułowanych założeń. Przeanalizowano parametry pracy przepływomierza z wykorzystaniem modeli matematycznych, wykonano wstępne badania laboratoryjne i przetestowano zasadę pomiaru na urządzeniu prototypowym. Do pomiaru stałej czasowej zaproponowano zastosowanie systemu przerwań procesora co automatycznie pozwala na realizację założeń Przemysłu 4.0 i IoT. W efekcie końcowym uzyskano wstępne rysunki konstrukcyjne konstrukcji urządzenia. Biorąc powyższe pod uwagę można przyjąć, że cel ogólny pracy został w pełni osiągnięty.

Celem badawczym pracy było sprawdzenie możliwości wykonania pomiaru strumienia wody metodą termiczną w zakresie przepływu burzliwego za pomocą badania wartości stałej czasowej.

Miarą, która wykorzystywana jest do praktycznego określania stopnia burzliwości przepływu jest liczba Reynoldsa. Z ogólnie dostępnej literatury wiadomo, że granicą przepływu laminarnego jest przybliżona wartość  $Re=2300$  [138], [139]. Dla wartości większych rozpoczyna się przepływ burzliwy. Z dostępnych badań wiadomo również, że w kanale o przekroju kołowym można utrzymać przepływ laminarny nawet dla  $Re=10000$  [138], [140], [141], więc granica ta nie jest zdefiniowana ostatecznie dla wszystkich przypadków. Na rysunku 10.1 przedstawiono ilustrację przepływu laminarnego, przejściowego i turbulentnego. W przypadku konstrukcji przepływomierza pierścieniowego oddziaływanie przepływu burzliwego pojawia się przy wyższych liczbach Reynoldsa niż jest to podawane w literaturze. Ma to związek z mocno przyściennym charakterem tego pomiaru [142].



Rys. 10.1. Ilustracja przepływu laminarnego, przejściowego i turbulentnego

Fig. 10.1. Illustration of laminar, transient and turbulent flow

Z mechaniki płynów wynika również wiedza o strukturze przechodzenia od przepływu laminarnego do turbulentnego w kanale o przekroju okrągłym. Istotnym szczegółem jest to, że w warstwie przyściennej utrzymuje się przepływ laminarny znacznie dłużej niż to ma miejsce w środku strumienia (rys. 10.1). Dlatego też, pomimo zachodzenia przepływu mieszanego lub turbulentnego ( $Re > 2300$ ), reakcja pierścieniowego czujnika przepływu jest dużo dłużej charakterystyczna jak dla przepływu laminarnego, niż to wynika z samej wartości liczby  $Re$ . Jak wykazano wcześniej, zakres działania proponowanego rozwiązania przepływomierza sięga wartości  $Re$  na poziomie 100 000, co oznacza bezwarunkowy przepływ burzliwy, w literaturze określa się, że  $Re > 50\ 000$  oznacza taki przepływ. PCP w odróżnieniu od znanych konstrukcji działa w warstwie przyściennej, co pozwala na działanie w zakresie laminarnym, podczas gdy przepływ jest klasyfikowany już jako turbulentny. Biorąc powyższe pod uwagę należy stwierdzić, że cel badawczy pracy został osiągnięty.

## **11. Kierunki dalszych prac i badań**

Przygotowana konstrukcja i uzyskane wyniki są pierwszym etapem rozwoju czujnika przepływu. Kierunki dalszych badań można zaplanować wielotorowo i to zarówno w obszarze badań eksperymentalnych jak i obliczeniowych. Szczególnie ważne wydają się precyzyjne pomiary laboratoryjne. Ogólna lista przyszłych potencjalnych zadań badawczych obejmuje następujące zagadnienia:

- 1) wykonanie dokładnego modelu fizycznego przepływomierza i jego badania, wprowadzenie korekt konstrukcji na podstawie wyników badań eksperymentalnych,
- 2) poprawa dokładności tablic zależności stałej czasowej od grubości kamienia,
- 3) badania własności cieplnych osadów kamiennych,
- 4) poszukiwania zastępczych metod badań laboratoryjnych przyrostu kamienia (w znacznie skróconym czasie),
- 5) poprawa precyzji algorytmów interpolacyjnych do pomiaru grubości osadu kamiennego, poszukiwanie optymalnych formuł matematycznych,
- 6) optymalizacja algorytmów do wyznaczania stałej czasowej,
- 7) optymalizacja konstrukcji obudowy przepływomierza minimalizująca wpływ warunków otoczenia na pomiar,
- 8) opracowanie niezawodnych modułów elektronicznych i wprowadzenie modułów WiFi i algorytmów IoT do sterowania systemem,
- 9) wprowadzenie obliczeń statystycznych do sterownika systemu (wielokrotny pomiar i uśrednienia wyniku),
- 10) opracowanie niezależnych metod zasilania przepływomierza, np. termogeneracyjnych.

Niemniej jednak, niezależnie od dalszego rozwoju tego rozwiązania, uzyskane już obecnie wyniki wydają się potwierdzać, że przyjęta koncepcja pomiaru ma potencjał rozwojowy.



## **12. Podsumowanie i wnioski końcowe**

Zaproponowany system pomiaru strumienia pracującego w warunkach długookresowego użytkowania w środowisku wody twardej jest rozwiązaniem spełniającym założone cele oraz przyjęte wymagania pracy.

Osad kamienny stanowi problem dla wszystkich urządzeń i elementów wchodzących w skład infrastruktury związanej z wodą. Skraca ich żywotność oraz wpływa na jakość pracy, w tym dokładność pomiarów, przede wszystkim strumienia przepływu. Opracowana zasada pomiaru oraz wynikająca z niej konstrukcja pierścieniowego czujnika przepływu (PCP) pozwala na pomiar strumienia pomimo występującej warstwy osadu kamiennego, umożliwia też oszacowanie jej grubości. Idea działania urządzenia jest prosta i wpisująca się w obecne trendy, tj. minimalizacji ilości mierzonych parametrów na rzecz zaawansowanych obliczeń wykonywanych przez nowoczesne komputery. Na podstawie szerokiej analizy przebiegu niewielkiej liczby sygnałów często możliwe jest wyznaczenie wielu wartości, w tym przypadku na podstawie pomiaru temperatury i czasu. PCP opiera swoje działanie o zależność stałej czasowej od strumienia przepływu oraz grubości warstwy osadu kamiennego. Stała czasowa w tym przypadku jest czasem chłodzenia czujnika do temperatury wody po wcześniejszym jego nagraniu. Pomiar wykonywany przez urządzenie odbywa się dwuetapowo. W pierwszym kroku szacowana jest grubość warstwy osadu kamiennego. Tablicując odpowiednią ilość wyników badań eksperymentalnych i interpolując dane uzyskujemy możliwość wyznaczenia grubości osadu kamiennego dla dowolnej wartości zmierzonej stałej czasowej. W drugim kroku następuje właściwy pomiar strumienia przepływającej wody w sposób analogiczny jak w kroku pierwszym. Mierząc stałą czasową czujnika PCP oraz znając wcześniej wyznaczoną grubość warstwy osadu kamiennego wyznaczony zostaje strumień przepływającej wody.

Na potrzeby badań opracowano model numeryczny w środowisku Ansys-CFX oraz schematy modelowania fizycznego w środowisku MatLab-Simscape. Kalibracja modeli została wykonana uwzględniając wyniki pomiarów eksperymentalnych uzyskane na dedykowanym stanowisku laboratoryjnym. Modele obliczeniowe pozwoliły na dokładną analizę zjawisk towarzyszących procesowi pomiaru w PCP. Istotną obserwacją w tym względzie było wyjaśnienie dlaczego charakterystyka pomiaru w PCP wykazuje cechy przepływu laminarnego podczas gdy liczba  $Re$  ma wartość powyżej krytycznej. Związane jest to z sposobem klasyfikacji rodzaju przepływu. Przepływ laminarny w warstwie przysciennej utrzymuje się pomimo, że liczba  $Re$  jest już powyżej wartości krytycznej. Ta pozorna niezgodność z literaturą

wynika stąd, że przepływ oceniany jest na podstawie liczby  $Re$  liczonej dla całego przekroju, PCP natomiast oddziałuje tylko w warstwie przyściennej, gdzie lokalna liczba  $Re$  jest nadal podkrytyczna. Opracowany przepływomierz został również przeanalizowany pod kątem potencjalnych błędów pomiarowych, poza oczywistymi wynikającymi z klasy metrologicznej zastosowanego rodzaju materiału czujnika, rozważono wpływ umiejscowienia PCP, dokładności czasu pomiaru oraz momentu jego rozpoczęcia i zakończenia. W pracy rozważono również aspekty optymalizacji konstrukcji dotyczące długości strefy pomiarowej, jak również główne przesłanki optymalności ekonomicznej konstrukcji.

Przygotowano konstrukcję, która umożliwi montaż urządzenia w sposób mało inwazyjny oraz pozwala ją rozwijać i modyfikować w oparciu o szczegółowe wymagania dla konkretnego obszaru zastosowań. Zakłada się dalsze prace i badania nad produktem w celu jego komercjalizacji.

Główne zrealizowane zadania badawcze, które doprowadziły do osiągnięcia celów pracy to:

- 1) analiza i wybór termicznej metody pomiaru strumienia,
- 2) opracowanie modeli obliczeniowych w systemie Ansys-CFX i Matlab-Simscape, szczegółowe badania modelowe przy użyciu modelu numerycznego oraz szerokie obliczenia parametryczne z wykorzystaniem modelu fizycznego,
- 3) budowa dedykowanego stanowiska laboratoryjnego i wykonanie szeregu serii pomiarów kalibracyjnych, zbudowano również bliźniak obliczeniowy stanowiska laboratoryjnego w środowisku Matlab-Simscape,
- 4) budowa prototypu urządzenia i wykonanie cykli pomiarowych na stanowisku laboratoryjnym,
- 5) kalibracja modeli obliczeniowych danymi pomiarowymi uzyskanymi na stanowisku badawczym,
- 6) analizy i badania parametryczne z wykorzystaniem modeli obliczeniowych, wstępne wyznaczenie tabel parametrów do określania grubości warstwy osadu kamiennego oraz wyznaczania wartości strumienia przepływu,
- 7) analiza szeregu wybranych parametrów dotyczących optymalności konstrukcji PCP,
- 8) budowa prototypowego oprogramowania wewnętrznego czujnika PCP, wykonano testy prototypu oprogramowania i wyznaczono wstępne błędy działania przyszłego przyrządu związane głównie z niedokładnościami interpolacji,

- 9) konstrukcja fizyczna prototypu PCP uwzględniająca zebrane doświadczenia wraz z wstępnymi rysunkami technicznymi,
- 10) analiza potencjalnych błędów pomiarowych wynikających z przyjętych założeń konstrukcyjnych i parametrów pracy urządzenia,
- 11) wyjaśnienie pozornej sprzeczności uzyskanych charakterystyk PCP z danymi literaturowymi.

Zaproponowana konstrukcja pierścieniowego czujnika przepływu jest rozwiązaniem wykorzystującym obecne możliwości procesorów pomiarowych i kładzie nacisk na uproszczenie pomiarów parametrów fizycznych na rzecz obróbki obliczeniowej mierzonych wartości. Przy odpowiedniej niezawodności części elektronicznej zapewnia to długą żywotność eksploatacyjną bez względu na warunki pracy. Budowa i zasada działania PCP umożliwia rozwój i doskonalenie tej konstrukcji, a nawet aktualizację oprogramowania wyprodukowanych już egzemplarzy.

Wnioski końcowe:

- przyjęta metoda pomiaru strumienia z wykorzystaniem charakterystyki czasowej PCP jest możliwa do realizacji,
- opracowany dwukrokowy cykl pomiarowy pozwala wyznaczyć jednocześnie wartość strumienia przepływu wody oraz grubość warstwy osadu kamiennego,
- pomiar stałej czasowej PCP w zakresie nadkrytycznych liczb  $Re$  jest trudny w realizacji ale możliwy przy obecnym stanie rozwoju techniki pomiarowej.

Głównym wnioskiem końcowym z przeprowadzonych badań jest stwierdzenie, że przyjęta konstrukcja przepływomierza, w warunkach jakie narzuciły założenia tej pracy, spełnia założone kryteria.

## Literatura

- [1] “The 17 goals of the Sustainable Development. United Nations.” Accessed: Nov. 16, 2021. [Online]. Available: <https://sdgs.un.org/goals>
- [2] “J. Alcamo, T. Henrichs i T. Rosch, World Water in 2025. Global modeling and scenario analysis for the World Commission on Water for the 21st century. Center for Environmental Systems Research University of Kassel, Feb 2000.” Accessed: Feb. 14, 2021. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/use-of-freshwater-resources-3/alcamo-et-al.-2000>
- [3] A. Czajkowski *et al.*, “Global Water Crisis: Concept of a New Interactive Shower Panel Based on IoT and Cloud Computing for Rational Water Consumption,” *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 4081, vol. 11, no. 9, p. 4081, Apr. 2021, doi: 10.3390/APP11094081.
- [4] “Cele Zrównoważonego Rozwoju prezentacja (wrzesień 2016 r.) Ośrodek Informacji ONZ w Warszawie. Online: <https://www.unic.un.org.pl/files/167/Prezentacja%20SDG%20wrzesień%202016%20-%20opisy%20slajdów.pdf> (24.01.2024).”
- [5] B. Gulbicka, *Problemy wyżywienia w krajach rozwijających się*. 2009.
- [6] Thier A., “Aksjologiczne, ekonomiczne i społeczne problemy gospodarki wodnej.,” *Ekonomia i Środowisko*, vol. 3, no. 54, pp. 10–24, 2015.
- [7] Tadeusz Pilch, “Problemy ubóstwa i wykluczenia z perspektywy najmłodszych.,” *Wyższa Szkoła Informatyki i Ekonomii TWP w Olsztynie*, pp. 1–14, 2020.
- [8] Joanna Mysona Byrska, “Zbywatele, prekariusze i praca w świecie konsumpcji,” *Filosophija*, vol. 15, no. 29, 2015.
- [9] E. S. Spang *et al.*, “The water consumption of energy production: an international comparison.,” 2014, doi: 10.1088/1748-9326/9/10/105002.
- [10] “The Atmosphere and the Water Cycle. USGS science for a changing world.” Accessed: Feb. 14, 2021. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/special-topic/water-science->

school/science/atmosphere-and-water-cycle?qt-science\_center\_objects=0#qt-science\_center\_objects

- [11] K. M. Kożuchowski, “Zawartość wody opadowej w atmosferze i opady w Polsce,” *Przegląd Geofizyczny*, vol. 3, no. 4, pp. 151–169, 2016.
- [12] “EMAS i zmieniona norma ISO 14001. Komisja Europejska.”
- [13] P. Zhang, Q. Liao, H. Yao, Y. Huang, H. Cheng, and L. Qu, “Direct solar steam generation system for clean water production,” *Energy Storage Materials*, vol. 18. Elsevier B.V., pp. 429–446, Mar. 01, 2019. doi: 10.1016/j.ensm.2018.10.006.
- [14] Orłowska A., “Czysta woda w produkcji drobiarskiej,” *Indyk Polski*, vol. 3, pp. 50–51, 2009.
- [15] B Binda and M Hermanowicz, “Woda z kranu jak ze źródła,” *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, 2007.
- [16] K. , Merc and L. Stępniaak, “Instalacje dualne jako alternatywa dla tradycyjnych instalacji wodociągowo-kanalizacyjnych,” *Portal komunikacji naukowej*, vol. 18, no. 4, pp. 549–562, 2015.
- [17] “A more measured world of water Measurement made easy for water and wastewater.”
- [18] “Wastewater reuse. Australian Government.Your Home, Australia’s guide to environmentally sustainable homes.” Accessed: Feb. 14, 2021. [Online]. Available: <https://www.yourhome.gov.au/water/wastewater-reuse>
- [19] Y. Wu, L. Wang, Y. Zhang, J. Wu, Q. Ma, and L. Yue, “Application of Marginal Rate of Transformation in Decision Making of Multi-Objective Reservoir Optimal Operation Scheme,” *Sustainability*, vol. 13, no. 3, p. 1488, Feb. 2021, doi: 10.3390/su13031488.
- [20] P. Billig, D. Bendahmane, and A. S. Series, “Water and Sanitation Indicators Measurement Guide.”
- [21] Bugajski P. and Kaczor G., “Struktura zużycia zimnej i ciepłej wody w gospodarstwie jednorodzinnym,” *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* , vol. 2, pp. 17–26, 2005.

- [22] R. Błażejowski and O. Szaj-Jędraszczyk, “Zastosowanie jądrowych estymatorów gęstości prawdopodobieństwa do opisu zużycia wody w gospodarstwie domowym,” *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, vol. 10, pp. 392–394, 2017.
- [23] Bugajski P., “Średnie zużycie zimnej i ciepłej wody w budynkach wielorodzinnych,” *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, vol. 09, pp. 105–113, 2009.
- [24] T. Borkowski and D. Gujak-Kaczor, “Detekcja wycieków w sieci wodociągowej w MPGK Sp. z o.o. w Chełmie,” *Portal komunikacji naukowej*, vol. 6, no. 14, pp. 53–54, 2011.
- [25] Florian G. Piechurski, “Wykorzystanie monitoringu sieci wodociągowej do obniżenia poziomu strat wody,” *Napędy i sterowanie*, vol. 2, pp. 66–71, 2013.
- [26] Wyczółkowski R. and Matysiak G., “Rozwój inteligentnego systemu monitorowania rozdzielczej sieci wodociągowej,” *Eksploatacja i Niezawodność*, vol. 2, pp. 71–75, 2009.
- [27] “NETL Modern Grid Strategy Powering our 21st-Century Economy. ADVANCED METERING INFRASTRUCTURE Conducted by the National Energy Technology Laboratory for the U.S. Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability February 2008. Online: [https://www.smart-energy.com/wp-content/uploads/i/AMI%2520White%2520paper%2520final%2520021108%2520%25282%2529%2520APPROVED\\_2008\\_02\\_12.pdf](https://www.smart-energy.com/wp-content/uploads/i/AMI%2520White%2520paper%2520final%2520021108%2520%25282%2529%2520APPROVED_2008_02_12.pdf) (18.01.2024).”
- [28] Ramyar Rashed Mohassel;, Alan S. Fung;, Farah Mohammadi;, and Kaamran Raahemifar, “A survey on advanced metering infrastructure and its application in Smart Grids,” *IEEEExplore*, vol. 27, pp. 0840–7789, 2014.
- [29] D. Wang, K. Hubacek, Y. Shan, W. Gerbens-Leenes, and J. Liu, “A Review of Water Stress and Water Footprint Accounting,” *Water (Basel)*, vol. 13, no. 2, p. 201, Jan. 2021, doi: 10.3390/w13020201.
- [30] J. Tarabay and J. B. Varkey, “The Potential Risks of Legionella Arising from Ligature-resistant Fixtures,” *Am J Infect Control*, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.AJIC.2023.08.007.

- [31] M. Yamasue *et al.*, “Rebound mortality rate of Legionella pneumonia in Japan,” *Respir Investig*, vol. 61, no. 4, pp. 487–489, Jul. 2023, doi: 10.1016/J.RESINV.2023.04.005.
- [32] A. C. J. Franze, “Social and environmental LCA of an ecolabeled notebook | Semantic Scholar.” Accessed: Oct. 21, 2022. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Social-and-environmental-LCA-of-an-ecolabeled-Franze-Ciroth/b6e6fdeeb076550ad6ea73518c352f964873145e>
- [33] B. Soust-verdaguer *et al.*, “Review of visualising LCA results in the design process of buildings,” vol. 190, no. August 2020, 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107530.
- [34] J. Quarini, “Ice-pigging to reduce and remove fouling and to achieve clean-in-place,” in *Applied Thermal Engineering*, Pergamon, Jul. 2002, pp. 747–753. doi: 10.1016/S1359-4311(02)00019-4.
- [35] M. Szulgowska-Zgrzywa, E. Stefanowicz, K. Piechurski, A. Chmielewska, and M. Kowalczyk, “Impact of Users’ Behavior and Real Weather Conditions on the Energy Consumption of Tenement Houses in Wrocław, Poland: Energy Performance Gap Simulation Based on a Model Calibrated by Field Measurements,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 24, p. 6707, Dec. 2020, doi: 10.3390/en13246707.
- [36] M. Torres-Bagur, A. Ribas, and J. Vila-Subirós, “Understanding the Key Factors That Influence Efficient Water-Saving Practices among Tourists: A Mediterranean Case Study,” *Water (Basel)*, vol. 12, no. 8, p. 2083, Jul. 2020, doi: 10.3390/w12082083.
- [37] “Innovative Water Recycling System. Hydraloop International.” Accessed: Feb. 14, 2021. [Online]. Available: <https://www.hydraloop.com/>
- [38] “Zasoby wodne w Polsce - Global Compact Network Poland.” Accessed: Feb. 14, 2021. [Online]. Available: [https://ungc.org.pl/info/zasoby-wodne-polsce/?fbclid=IwAR28gdYVOKFQP4mamhWKIH7dh4GQemRC2KVENzbymdiB\\_8aoUFE14KkS0yc](https://ungc.org.pl/info/zasoby-wodne-polsce/?fbclid=IwAR28gdYVOKFQP4mamhWKIH7dh4GQemRC2KVENzbymdiB_8aoUFE14KkS0yc)
- [39] L. Moriconi, T. Nascimento, B. G. B. de Souza, and J. B. R. Loureiro, “Top-down model of calcium carbonate scale formation in turbulent pipe flows,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 28, p. 101141, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.TSEP.2021.101141.

- [40] P. G. Koutsoukos and C. G. Kontoyannis, "Precipitation of calcium carbonate in aqueous solutions," *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, vol. 80, no. 5, pp. 1181–1192, Jan. 1984, doi: 10.1039/F19848001181.
- [41] L. Lin, W. Jiang, X. Xu, and P. Xu, "A critical review of the application of electromagnetic fields for scaling control in water systems: mechanisms, characterization, and operation," *npj Clean Water 2020 3:1*, vol. 3, no. 1, pp. 1–19, Jun. 2020, doi: 10.1038/s41545-020-0071-9.
- [42] A. Neville, "Surface Scaling in the Oil and Gas Sector: Understanding the Process and Means of Management," *Energy and Fuels*, vol. 26, no. 7, pp. 4158–4166, Jul. 2012, doi: 10.1021/EF300351W.
- [43] A. A. Olajire, "A review of oilfield scale management technology for oil and gas production," *J Pet Sci Eng*, vol. C, no. 135, pp. 723–737, Nov. 2015, doi: 10.1016/J.PETROL.2015.09.011.
- [44] G. Jereb, B. Poljšak, and I. Eržen, "Contribution of Drinking Water Softeners to Daily Phosphate Intake in Slovenia," *International Journal of Environmental Research and Public Health 2017, Vol. 14, Page 1186*, vol. 14, no. 10, p. 1186, Oct. 2017, doi: 10.3390/IJERPH14101186.
- [45] M. Broby, M. Neteland, X. Ma, J. P. Andreassen, and M. Seiersten, "Scaling of calcium carbonate on heated surfaces - Crystallization or particulate fouling?," *Society of Petroleum Engineers - SPE International Oilfield Scale Conference and Exhibition*, 2016, doi: 10.2118/179901-MS.
- [46] O. Bello, "Calcium Carbonate Scale Deposition Kinetics on Stainless Steel Surfaces," *Calcium Carbonate Scale Deposition Kinetics on Stainless Steel Surfaces*, 2017.
- [47] J. Rieger, T. Frechen, G. Cox, W. Heckmann, C. Schmidt, and J. Thieme, "Precursor structures in the crystallization/precipitation processes of CaCO<sub>3</sub> and control of particle formation by polyelectrolytes," *Faraday Discuss*, vol. 136, no. 0, pp. 265–277, Aug. 2007, doi: 10.1039/B701450C.



- [48] D. Gebauer, A. Völkel, and H. Cölfen, “Stable prenucleation calcium carbonate clusters,” *Science*, vol. 322, no. 5909, pp. 1819–1822, Dec. 2008, doi: 10.1126/SCIENCE.1164271.
- [49] A. F. Wallace *et al.*, “Microscopic evidence for liquid-liquid separation in supersaturated CaCO<sub>3</sub> solutions,” *Science*, vol. 341, no. 6148, pp. 885–889, 2013, doi: 10.1126/SCIENCE.1230915.
- [50] M. H. Nielsen, S. Aloni, and J. J. De Yoreo, “In situ TEM imaging of CaCO<sub>3</sub> nucleation reveals coexistence of direct and indirect pathways,” *Science*, vol. 345, no. 6201, pp. 1158–1162, Sep. 2014, doi: 10.1126/SCIENCE.1254051.
- [51] A. Koishi, “Carbonate mineral nucleation pathways,” Oct. 2017, Accessed: Jul. 28, 2023. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-01701947>
- [52] A. Carino, A. Testino, M. R. Andalibi, F. Pilger, P. Bowen, and C. Ludwig, “Thermodynamic-Kinetic Precipitation Modeling. A Case Study: The Amorphous Calcium Carbonate (ACC) Precipitation Pathway Unravelled,” *Crystal Growth & Design*, vol. 17, no. 4, pp. 2006–2015, Apr. 2017, doi: 10.1021/ACS.CGD.7B00006.
- [53] A. V. A. de Souza, F. Rosário, and J. Cajaiba, “Evaluation of Calcium Carbonate Inhibitors Using Sintered Metal Filter in a Pressurized Dynamic System,” *Materials*, vol. 12, no. 11, Jun. 2019, doi: 10.3390/MA12111849.
- [54] D. Kocsis, “Modeling and vibration analysis of limescale deposition in geothermal pipes,” *Environ Eng Manag J*, vol. 13, no. 11, pp. 2817–2824, 2014, doi: 10.30638/EEMJ.2014.315.
- [55] N. Hafid, M. Belaatar, S. Ben-Aazza, A. Hadfi, M. Ezahri, and A. Driouiche, “Characterization of Scale Formed in Drinking Water and Hot Water Pipes in the Taliouine Downtown—Morocco,” *Am J Analyt Chem*, vol. 06, no. 08, pp. 677–686, 2015, doi: 10.4236/AJAC.2015.68065.
- [56] K. Lee, “Ultrasonic technique for measuring the thickness of scale on the inner surfaces of pipes,” *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 56, no. 2, pp. 558–561, Feb. 2010, doi: 10.3938/JKPS.56.558.

- [57] V. Woodward, R. Williams, and Z. Amjad, “Analytical Techniques for Identifying Mineral Scales and Deposits,” *The Science and Technology of Industrial Water Treatment*, pp. 425–445, Apr. 2010, doi: 10.1201/9781420071450-C21.
- [58] O. Bello, “Calcium Carbonate Scale Deposition Kinetics on Stainless Steel Surfaces,” *PhD thesis*, 2017.
- [59] S. Kumar, T. K. Naiya, and T. Kumar, “Developments in oilfield scale handling towards green technology-A review,” *J Pet Sci Eng*, vol. 169, pp. 428–444, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.PETROL.2018.05.068.
- [60] M. A. Jafar Mazumder, “A Review of Green Scale Inhibitors: Process, Types, Mechanism and Properties,” *Coatings 2020, Vol. 10, Page 928*, vol. 10, no. 10, p. 928, Sep. 2020, doi: 10.3390/COATINGS10100928.
- [61] “The EU Green Deal – a roadmap to sustainable economies.” Accessed: Aug. 20, 2021. [Online]. Available: <https://www.switchtogreen.eu/the-eu-green-deal-promoting-a-green-notable-circular-economy/?fbclid=IwAR3Qjwk5f6D-OQG1SniG0iZSE8uACoVsI4fkEeTs6RsH38GCG-FcN6nAZdE>
- [62] A. Saifi, A. El Amiri, A. Elhassnaoui, A. Obbadi, Y. Errami, and S. Sahnoun, “Thermography model for detecting the scale thickness in water pipes,” *Proceedings of 2015 IEEE International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2015*, Apr. 2016, doi: 10.1109/IRSEC.2015.7455070.
- [63] M. Mehrabi, M. H. Soorgee, H. Habibi, and V. Kappatos, “A novel application of ultrasonic Lamb waves: studying adhesive effects on the inspection of coating debonding in a three-layer waveguide,” *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 36, no. 6, pp. 616–636, 2021, doi: 10.1080/10589759.2020.1843653.
- [64] A. S. Tyusenkov and S. E. Cherepashkin, “Scale inhibitor for boiler water systems,” *Russian Journal of Applied Chemistry*, vol. 87, no. 9, pp. 1240–1245, Sep. 2014, doi: 10.1134/S1070427214090080.
- [65] “Przepływomierz z rotorem DRG - Przemysłowe urządzenia pomiarowo-kontrolne w zakresie przepływu, ciśnienia, poziomu i temperatury | Kobold Messring GmbH.”

- Accessed: Aug. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.kobold.com/Przep%C5%82ywomierz-z-rotorem-DRG>
- [66] “Łopatkowy sygnalizator przepływu z mieszkiem FPS - Przemysłowe urządzenia pomiarowo-kontrolne w zakresie przepływu, ciśnienia, poziomu i temperatury | Kobold Messring GmbH.” Accessed: Aug. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.kobold.com/%C5%81opatkowy-sygnalizator-przep%C5%82ywu-z-mieszkiem-FPS>
- [67] “Przepływomierz owalno-zębaty LM OG TI 100 - Kerto Automation.” Accessed: Aug. 30, 2023. [Online]. Available: <https://kerto-automation.pl/product/przeplywomierz-owalno-zebaty-lm-og-ti-100/>
- [68] “Jak działa przepływomierz tłokowy? Funkcje, cechy i zastosowania.” Accessed: Aug. 30, 2023. [Online]. Available: [https://aea-technique.pl/blog/jak-dziala-przeplywomierz-tlokowy/?gclid=Cj0KCQjw0bunBhD9ARIsAAZl0E3c8XbtpJBISOKJfaV7TC6QGXPguZexZw9HdaYNil3PBO3tlaTy4OAaArfeEALw\\_wcB](https://aea-technique.pl/blog/jak-dziala-przeplywomierz-tlokowy/?gclid=Cj0KCQjw0bunBhD9ARIsAAZl0E3c8XbtpJBISOKJfaV7TC6QGXPguZexZw9HdaYNil3PBO3tlaTy4OAaArfeEALw_wcB)
- [69] “Rotometr VFA.” Accessed: Aug. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.test-therm.pl/katalog-produktow/43-rotametry/298-rotametr-vfa>
- [70] “Przepływomierz wirowy Vortek in-line model M22.” Accessed: Aug. 30, 2023. [Online]. Available: [https://www.introl.pl/katalog/przeplywomierze/przeplywomierze\\_wirowe/przeplywomierz\\_wirowy\\_inline](https://www.introl.pl/katalog/przeplywomierze/przeplywomierze_wirowe/przeplywomierz_wirowy_inline)
- [71] “Ultradźwiękowy przepływomierz DUK.” Accessed: Aug. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.simex.pl/pl/katalog/ultradzwiekowe/duk>
- [72] “BAMOMATIC - Przepływomierz elektromagnetyczny.” Accessed: Aug. 30, 2023. [Online]. Available: [https://www.bamo.pl/cbx/s4\\_page1987\\_1865.htm](https://www.bamo.pl/cbx/s4_page1987_1865.htm)
- [73] “Przepływomierz masowy Coriolisa - Pomiar przepływu | ABB.” Accessed: Aug. 30, 2023. [Online]. Available: <https://new.abb.com/products/measurement-products/pl/pomiar-przeplywu/przeplywomierz-masowy-coriolisa>

- [74] “Przepływomierze tłokowo-pierścieniowe > FlowMarket.pl.” Accessed: Aug. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.flowmarket.pl/oferta/przeplywomierze/mechaniczne/przeplywomierze-tlokowo-pierscieniowe/>
- [75] “Proline t-mass T 150 Termiczny przepływomierz masowy | Endress+Hauser”.
- [76] “Thermal mass flow sensor for liquids. Online: <https://www.bronkhorst.com/en-us/service-support/knowledge-base/thermal-mass-flow-sensor-for-liquids/> (12.01.2024)”.
- [77] “Masowe, termiczne przepływomierze i sygnalizatory. Poza kontrolą. Online: Masowe, termiczne przepływomierze i sygnalizatory (19.01.2024)”.
- [78] “Montowanie urządzeń i pomiary przepływu. Online: [https://www.smartmeasurement.com/pl/thermal-measuring-principle/http://mechanik.edu.pl/mechatronika/montowanie\\_urzadzen/pomiary\\_przeplywu/pomiar\\_przeplywu.pdf](https://www.smartmeasurement.com/pl/thermal-measuring-principle/http://mechanik.edu.pl/mechatronika/montowanie_urzadzen/pomiary_przeplywu/pomiar_przeplywu.pdf) (10.01.2024).”
- [79] “Understanding How Thermal Mass Flow Meters Work. Online: <https://www.crossco.com/resources/articles/understanding-how-thermal-mass-flow-meters-work/> (18.01.2024)”.
- [80] “Technika sensorowa. Czujniki płynów. Online: <https://home.agh.edu.pl/~maziarz/userfiles/downloads/TS-6-cz.przeplywu.pdf> (20.01.2024).”
- [81] “Thermal Flowmeters. Cambridge 2016. Online: <https://www.cambridge.org/core/books/abs/flow-measurement-handbook/thermal-flowmeters/FCFAFFEC4A38845DB7AC6E8DBD03C549> (11.01.2024).”
- [82] Woong Kang, Hae-Man Choi, and Yong-Moon Choi, “Development of MEMS-based thermal mass flow sensors for high sensitivity and wide flow rate range,” *Journal of Mechanical Science and Technology* , vol. 32, pp. 4237–4243, 2018.

- [83] “Thermal Mass flow sensor for liquids. Online: <https://www.bronkhorst.com/en-us/service-support/knowledge-base/thermal-mass-flow-sensor-for-liquids/> (11.06.2022).”
- [84] J. Landskron, F. Dötzer, A. Benkert, M. Mayle, and K. S. Drese, “Acoustic Limescale Layer and Temperature Measurement in Ultrasonic Flow Meters,” *Sensors 2022, Vol. 22, Page 6648*, vol. 22, no. 17, p. 6648, Sep. 2022, doi: 10.3390/S22176648.
- [85] H. Koruk, M. Serenli, and K. Y. Sanliturk, “Application of ultrasonic vibrations for minimization of the accumulation of limescale in steam irons,” *Applied Acoustics*, vol. 135, pp. 22–28, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.APACOUST.2018.01.024.
- [86] D. Georgiou, D. Bendos, M. Kalis, and C. Koutis, “Removal and/or prevention of limescale in plumbing tubes by a radio-frequency alternating electric field inductance device,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 22, pp. 34–40, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.JWPE.2017.12.013.
- [87] “Przemysł 4.0 | Deloitte.” Accessed: Jul. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www2.deloitte.com/pl/pl/pages/zarzadzania-procesami-i-strategiczne/topics/przemysl40.html>
- [88] “European Commission (2023) Critical Raw Materials: ensuring secure and sustainable supply chains for EU’s green and digital future [Online] Available at: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_23\\_1661](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1661) [Accessed on 19 April 2023]”.
- [89] “Fägerston, B. (2022) Leveraging Science Diplomacy in an Era of Geo-Economic Rivalry – Towards a European Strategy - UI Report No. 1 [Online] Available at: <https://www.ui.se/globalassets/ui.se-eng/publications/ui-publications/2022/ui-report-no.-1-2022.pdf> [Accessed on 19 April 2023]”.
- [90] “International Energy Agency (2022) The Role of Critical World Energy Outlook Special Report Minerals in Clean Energy Transitions.” Accessed: Jun. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

- [91] M. Rani, P. Choudhary, V. Krishnan, and S. Zafar, “Development of sustainable microwave-based approach to recover glass fibers for wind turbine blades composite waste,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 179, p. 106107, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2021.106107.
- [92] “Thermal Mass Gas Flow Meters. Online: <https://www.fluidcomponents.com/products/mass-flow-meters> (01.02.2024).”
- [93] Ewa M. Kwiatkowska, “Rozwój Internetu rzeczy – szanse i zagrożenia,” *Internetowy Kwartalnik Antymonopolowy i Regulacyjny*, vol. 8, no. 3, pp. 60–70, 2014.
- [94] Ewa Stawiarska, “Diagnoza poziomu dojrzałości wdrażania rozwiązań Przemysłu 4.0 w kontekście społecznej odpowiedzialności przedsiębiorstwa. Online: <https://elearning.przemyslprzyszlosci.gov.pl/diagnoza-poziomu-dojrzalosci-wdrazania-rozwiazan-przemyslu-4-0-w-kontekście-społecznej-odpowiedzialności-przedsiębiorstwa/> (04.01.2024).”
- [95] Gajdzik Bożena, “Operator maszyn i urządzeń w Przemysle 4.0 — wprowadzenie do tematu,” *Gospodarka Materialowa i Logistyka*, vol. 5, pp. 2–7, 2021.
- [96] Krzysztof Bartoszek and Krzysztof Skiba, “Wpływ rodzaju termometru i osłony na pomiary temperatury powietrza,” *Katedra Agrometeorologii Akademia Rolnicza w Lublinie. Universitatis Mariae Curie - Skłodowska*, vol. 11, no. 3, pp. 34–38, 2006.
- [97] “Stała czasowa. Online: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Stała\\_czasowa](https://pl.wikipedia.org/wiki/Stała_czasowa) (10.02.2023).”
- [98] A. L. Hazel and M. Heil, “Surface-tension-induced buckling of liquid-lined elastic tubes: A model for pulmonary airway closure,” *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 461, no. 2058, pp. 1847–1868, Jun. 2005, doi: 10.1098/RSPA.2005.1453.
- [99] N. Maleki-Jirsaraei, B. Ghane-Motlagh, S. Baradaran, E. Shekarian, and S. Rouhani, “Fractal flow of inhomogeneous fluids over smooth inclined surfaces and determination of their fractal dimensions and universality classes,” *Journal of Physics Condensed Matter*, vol. 17, no. 14, Apr. 2005, doi: 10.1088/0953-8984/17/14/011.

- [100] R. L. Chuoke, P. van Meurs, and C. van der Poel, “The Instability of Slow, Immiscible, Viscous Liquid-Liquid Displacements in Permeable Media,” *Transactions of the AIME*, vol. 216, no. 01, pp. 188–194, Dec. 1959, doi: 10.2118/1141-G.
- [101] S. Sadr, N. Maleki-Jirsaraei, and S. Rouhani, “Experimental and analytical approaches toward controlling viscous fingering at the interface of two immiscible fluids using the optimal constant piecewise injection rate,” *Int J Non Linear Mech*, vol. 157, p. 104545, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.IJNONLINMEC.2023.104545.
- [102] J. Sohaili, H. S. Shi, Lavania-Baloo, N. H. Zardari, N. Ahmad, and S. K. Muniyandi, “Removal of scale deposition on pipe walls by using magnetic field treatment and the effects of magnetic strength,” *J Clean Prod*, vol. 139, pp. 1393–1399, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2016.09.028.
- [103] “Sposób wykrywania wewnętrznego osadu kamiennego w układach hydraulicznych oraz urządzenie do realizacji tego sposobu.” Nr patentu P.436929. 2021. Online: <https://ewyszukiwarka.pue.uprp.gov.pl/search/pwp-details/P.436929> (18.01.2024).
- [104] “Dokładny i powtarzalny pomiar przepływu, czyli prostownica umienia na froncie.” Online: <https://akademia-automatyki.pl/blog/2021/09/01/dokladny-i-powtarzalny-pomiar-przeplywu-czyli-prostownica-strumienia-na-froncie/> (03.02.2021).
- [105] “Przepływ wody w rurach. Online: <https://instsani.pl/technik-urzadzen-i-systemow-energetyki-odnawialnej/vademecum-energetyki-odnawialnej/energia-wod-plynacych/podstawy-hydrauliki/przeplyw-wody-w-rurach/> (12.01.2023).”
- [106] “Liczba Reynoldsa dla przepływów w rurociągach. 2021. Online: <https://inzynieriasrodowiska.com.pl/encyklopedia/liczba-reynoldsa-dla-przeplywow-w-rurociagach> (21.01.2024).”
- [107] D. Jackson and B. Launder, “Osborne Reynolds and the publication of his papers on turbulent flow,” *Annu Rev Fluid Mech*, vol. 39, pp. 19–35, 2007, doi: 10.1146/ANNUREV.FLUID.39.050905.110241.
- [108] M. M. Denn, “Issues in Viscoelastic Fluid Mechanics,” *Annu Rev Fluid Mech*, vol. 22, no. 1, pp. 13–32, Jan. 1990, doi: 10.1146/ANNUREV.FL.22.010190.000305.

- [109] N. Rott, “Note on the History of the Reynolds Number,” <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.fl.22.010190.000245>, vol. 22, no. 1, pp. 1–12, Nov. 2003, doi: 10.1146/ANNUREV.FL.22.010190.000245.
- [110] W. Brown, “Heat-flux transitions at low Rayleigh number,” *J Fluid Mech*, vol. 60, no. 3, pp. 539–559, Sep. 1973, doi: 10.1017/S0022112073000339.
- [111] Wojciech Mieszczak, “modelowanie mes zakłóceń przepływu ciepła przy pomiarach temperatury skrawania metodą termoelementu obcego,” *Inżynieria Maszyn*, vol. 17, no. 3, pp. 57–71, 2012.
- [112] K. Rup and M. Soczówka, “Przemysław Błasiak Politechnika Wrocławska,” *Portal komunikacji naukowej*, vol. 117, no. 2, pp. 169–174, 2000.
- [113] Przemysław Błasiak, “Badania numeryczne mechanicznego usuwania Termicznej warstwy przyściennej dla nieskończonej Kaskady łopatek skrobiących,” *Technical Issues*, vol. 1, pp. 13–21, 2015.
- [114] Arash Karimipour, Alireza Hossein Nezhad, Annunziata D’orazio, and Ebrahim Shirani, “The effects of inclination angle and prandtl number on the mixed convection in the inclined lid driven cavity using lattice boltzmann method,” *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 2, pp. 447–462, 2013.
- [115] Mateusz Turkowski, “Pomiary pulsującego strumienia płynu. Zastosowanie przepływomierzy turbinowych do pomiaru pulsującego strumienia płynu,” *Pomiary Automatyka Robotyka*, vol. 1, pp. 38–41, 2006.
- [116] A. Wróblewska, “Koncepcja stanowiska bawczego do wyznaczenia stałej czasowej wymiennika ciepła typu para wodna-woda,” *Journal of Mechanical and Transport Engineering*, vol. 65, no. 2, pp. 45--51, 2013.
- [117] “Puzdrowska, P. (2018). Metoda wyznaczania stałej czasowej termopary na podstawie pomiaru szybkozmiennej temperatury spalin wylotowych silnika o ZS. Scientific Journal of Gdynia Maritime University, 108, 115-133.”
- [118] Z. Meyer and R. Bednarek, “Stała czasowa w empirycznym modelu osiadania gruntu organicznego,” *Zeszyty Naukowe Budownictwo*, vol. 97, pp. 109–117, 2003.



- [119] Suchocki K., “Wpływ kształtu elektrody woltamperometrycznej na jej właściwości metrologiczne w dziedzinie czasu,” *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 60, no. 12, pp. 1163--1165, 2014.
- [120] Adam Dąbrowski and Paweł Pawłowski, “Multiwibrator astabilny jako przykład układu tranzystorowego ze sprzężeniem zwrotnym w nauczaniu podstaw elektroniki,” *Przegląd elektrotechniczny*, vol. 10, no. 95, pp. 121–124, 2019.
- [121] W. Jałmużny, “Stała czasowa obwodu pierwotnego w badaniach laboratoryjnych przekładników prądowych klasy TP - możliwości i ograniczenia,” *Zeszyty Naukowe. Elektryka / Politechnika Łódzka*, no. z. 110, pp. 51–60, 2006, Accessed: Sep. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-article-LOD1-0009-0027>
- [122] Z. Naukowe Akademii Morskiej Gdyni and P. Puzdrowska, “Metoda wyznaczania stałej czasowej termopary na podstawie pomiaru szybkozmiennnej temperatury spalin wylotowych silnika o ZS,” *Scientific Journal of Gdynia Maritime University*, no. 108, pp. 115–133, 2018, doi: 10.26408/108.10.
- [123] Z. Meyer and R. Bednarek, “Stała czasowa w empirycznym modelu osiadania gruntu organicznego,” *Zeszyty Naukowe. Budownictwo / Politechnika Śląska*, no. z. 97, pp. 109–117, 2003, Accessed: Sep. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-article-BSL2-0008-0013>
- [124] F. H. Busse and J. A. Whitehead, “Instabilities of convection rolls in a high Prandtl number fluid,” *J Fluid Mech*, vol. 47, no. 2, pp. 305–320, May 1971, doi: 10.1017/S0022112071001071.
- [125] D. R. Moore and N. O. Weiss, “Two-dimensional Rayleigh-Benard convection,” *J Fluid Mech*, vol. 58, no. 2, pp. 289–312, 1973, doi: 10.1017/S0022112073002600.
- [126] C. P. East, T. L. Schiller, C. M. Fellows, and W. O. S. Doherty, “Analytical Techniques to Characterize Scales and Deposits,” *Mineral Scales and Deposits: Scientific and Technological Approaches*, pp. 681–699, May 2015, doi: 10.1016/B978-0-444-63228-9.00028-0.

- [127] T. Chen and Q. Wang, “Mineral scale deposits—Analysis and interpretation,” *Water-Formed Deposits: Fundamentals and Mitigation Strategies*, pp. 783–794, Jan. 2022, doi: 10.1016/B978-0-12-822896-8.00021-2.
- [128] J. Landskron, F. Dötzer, A. Benkert, M. Mayle, and K. S. Drese, “Acoustic Limescale Layer and Temperature Measurement in Ultrasonic Flow Meters,” *Sensors 2022, Vol. 22, Page 6648*, vol. 22, no. 17, p. 6648, Sep. 2022, doi: 10.3390/S22176648.
- [129] F. J. Arregui, L. Pastor-Jabaloyes, A. V. Mercedes, and F. J. Gavara, “Accuracy of solid-state residential water meters under intermittent flow conditions,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 18, pp. 1–28, Sep. 2020, doi: 10.3390/S20185339.
- [130] F. Jiang *et al.*, “Modeling the sediment transport capacity of rill flow using a soil-rock mixture on steep slopes,” *J Hydrol Reg Stud*, vol. 49, p. 101512, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.EJRH.2023.101512.
- [131] B. Aghel, M. Mohadesi, A. Ansari, and M. Maleki, “Pilot-scale production of biodiesel from waste cooking oil using kettle limescale as a heterogeneous catalyst,” *Renew Energy*, vol. 142, pp. 207–214, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.RENENE.2019.04.100.
- [132] “Physical properties of a thermal liquid - MATLAB - MathWorks Switzerland.” Accessed: Sep. 19, 2023. [Online]. Available: [https://ch.mathworks.com/help/simscape/ref/thermalliquidsettingstl.html?s\\_tid=doc\\_ta](https://ch.mathworks.com/help/simscape/ref/thermalliquidsettingstl.html?s_tid=doc_ta)
- [133] “Mass in thermal systems. Online: [https://www.mathworks.com/help/releases/R2022b/simscape/ref/thermalmass.html?s\\_tid=doc\\_ta](https://www.mathworks.com/help/releases/R2022b/simscape/ref/thermalmass.html?s_tid=doc_ta) (15.02.2020).”
- [134] “Constant resistance in thermal systems. Online: [https://www.mathworks.com/help/releases/R2022b/simscape/ref/thermalresistance.html?s\\_tid=doc\\_ta](https://www.mathworks.com/help/releases/R2022b/simscape/ref/thermalresistance.html?s_tid=doc_ta) (14.02.2020).”
- [135] “Rigid conduit for fluid flow in thermal liquid systems. Online: [https://www.mathworks.com/help/releases/R2022b/simscape/ref/pipetl.html?s\\_tid=doc\\_ta](https://www.mathworks.com/help/releases/R2022b/simscape/ref/pipetl.html?s_tid=doc_ta) (14.02.2020).”

- [136] “Constant resistance in thermal systems - MATLAB - MathWorks Switzerland.” Accessed: Sep. 19, 2023. [Online]. Available: <https://ch.mathworks.com/help/releases/R2022b/simscape/ref/thermalresistance.html>
- [137] “Variable source of thermal energy, characterized by temperature - MATLAB - MathWorks Switzerland.” Accessed: Sep. 19, 2023. [Online]. Available: <https://ch.mathworks.com/help/releases/R2022b/simscape/ref/controlledtemperaturesource.html>
- [138] “Reynold’s number (and turbulent flow). Cambridge 2014. Online <https://www.cambridge.org/core/books/abs/essential-equations-for-anaesthesia/reynolds-number-and-turbulent-flow/DFD55E4B8FA548CD8AB9F47B66115F5F> (05.08.2022).”
- [139] “Rodzaje przepływu płynu. Online: [https://cms-v1-files.superszkolna.pl/sites/618/cms/szablony/24348/pliki/7\\_rodzaje\\_przeplywu\\_plynu\\_gazu\\_lub\\_cieczy.pdf](https://cms-v1-files.superszkolna.pl/sites/618/cms/szablony/24348/pliki/7_rodzaje_przeplywu_plynu_gazu_lub_cieczy.pdf) (11.01.2024).”
- [140] L. Laguarda, S. Hickel, F.F.J. Schrijer, and B.W. van Oudheusden, “Assessment of Reynolds number effects in supersonic turbulent boundary layers,” *Int J Heat Fluid Flow*, vol. 105, p. 109234, 2024.
- [141] Susmita Das, Santanu Raut, and Kajal Kumar Mondal, “Analyzing the effects of suction and injection Reynolds number on the transport process in a hydromagnetic flow through a channel of reactive porous walls,” *Chinese Journal of Physics*, vol. 87, pp. 510–524, 2024.
- [142] “Pomiary cieplne i energetyczne, WNT, Warszawa 1985. Online: <https://skrypt.com.pl/product/mieszkowski-m-red-pomiary-cieplne-i-energetyczne/> (23.04.2022).”
- [143] “Czujniki oporowe nawinięte na elementy szklane - Guenther.” Accessed: Aug. 08, 2023. [Online]. Available: <https://www.guenther.com.pl/pl/informacje-techniczne/termometry-rezystancyjne/Czujniki-oporowe-nawini%C4%99te-na-elementy-szklane>

- [144] M. H. I. and G. A. O., “Mechanics of Two Immiscible Fluids in Porous Media,” *Journ. Apply. Phys*, vol. 25, no. 11, pp. 1400–1406.
- [145] M. M. and W. R. D., “An Approximate Theory of Water Coning in Oil Production,” *Transactions AIME*, vol. 114, pp. 144–161.
- [146] E. Shirman and A. K. Wojtanowicz, “Water Cone Histeresis and Reversal for Well Completions Using the Moving Spherical Sink Method,” *Proceedings - SPE Production Operations Symposium*, pp. 611–616, Mar. 1997, doi: 10.2118/37467-MS.
- [147] Główny Urząd Miar, “Certyfikat badania typu WE nr PL 08 010/MI - 004,” [www.gum.gov.pl/ftp/media/2189/PL\\_08\\_010\\_MI\\_004.pdf](http://www.gum.gov.pl/ftp/media/2189/PL_08_010_MI_004.pdf).
- [148] Héctor Cañas, Manuel Díaz-Madroñero, Josefa Mula, and Francisco Campuzano-Bolarín, “Implementing Industry 4.0 principles,” *Comput Ind Eng*, vol. 158, p. 107379, 2021.
- [149] Morteza Ghobakhloo, “Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability,” *J Clean Prod*, vol. 252, p. 119869, 2020.
- [150] “Polscy naukowcy wymyślili inteligentny prysznic. "Można rozpoznawać twarz, a na podstawie tego wyświetlać ulubiony film. Online: <https://dziendobry.tvn.pl/dom/inteligentny-prysznic-wynalazek-naukowcow-z-politechniki-slaskiej-jak-dziala-da328522-ls5317179> (25.01.2024).”
- [151] “High-performance and DSP with FPU, Arm Cortex-M7 MCU with 64 Kbytes of Flash memory, 216 MHz CPU, Art Accelerator, L1 cache, HW crypto, SDRAM. Online: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f730z8.html> (21.01.2014).”

## **Streszczenie**

Proces osadzania się kamienia kotłowego jest przyczyną postępującej degradacji kanałów hydraulicznych oraz innych elementów infrastruktury mających kontakt z wodą twardą. Na uszkodzenia w takich warunkach szczególnie narażone są aktualnie stosowane przepływomierze. Opracowanie nowego sposobu pomiaru przepływu uwzględniającego obecność osadu kamiennego w rurociągu jest zadaniem, którego podjął się Autor. Postępujący w czasie proces tworzenia się osadu jest przyczyną niekorzystnych zmian parametrów eksploatacyjnych wywołanych zmniejszaniem się efektywnego przekroju (średnicy) układu hydraulicznego oraz utratą pewności działania ustroju pomiarowego. Niniejsza praca prezentuje koncepcję nowego rozwiązania przepływomierza uwzględniającego obecność osadu kamiennego w rurociągu – którego głównym elementem jest pierścieniowy czujnik przepływu (PCP) – wykorzystującego metodę przynależną do grupy termicznych pomiarów masowych. Zasadę działania urządzenia oparto o zależność wartości wybranego parametru, stałej czasowej czujnika temperatury, od strumienia przepływu wody oraz grubości osadu kamiennego. Zaproponowane rozwiązanie charakteryzuje się prostą konstrukcją i pomiarem tylko jednego parametru, w tym przypadku przebiegu zmian temperatury w czasie. Na tej podstawie wyznaczana jest grubość warstwy osadu kamiennego, a następnie strumień przepływającej wody. Założenia koncepcyjne zostały zweryfikowane przy pomocy przygotowanych modeli obliczeniowych, a następnie wykonanych pomiarów eksperymentalnych. Przeanalizowano również wpływ miejsca montażu PCP na potencjalne błędy pomiarowe. Opracowano tablice zależności stałej czasowej od grubości osadu kamiennego oraz strumienia przepływu. Wykonano obliczenia parametryczne dla modelu numerycznego oraz schematu modelowania fizycznego. Uzyskane wyniki umożliwiły zaproponowanie rozwiązania konstrukcyjnego PCP. Poddano dyskusji wstępne warunki optymalizacji proponowanego rozwiązania. Uzyskane wyniki oraz wnioski płynące z przeprowadzonych badań mogą stanowić podstawę do dalszych prac rozwojowych i analiz teoretycznych nad prezentowanym zagadnieniem.

## **Abstract**

The process of scale deposition is the cause of progressive degradation of hydraulic channels and other infrastructure elements in contact with hard water. Currently used flow meters are particularly susceptible to damage in such conditions. Developing a new method of flow measurement that takes into account the presence of scale deposits in the pipeline is a task undertaken by the author. The process of deposit formation progressing over time is the cause of unfavorable changes in operating parameters caused by a decrease in the effective cross-section (diameter) of the hydraulic system and a loss of operational reliability of the measuring system. This work presents the concept of a new flowmeter solution – taking into account the presence of scale in the pipeline - the main element of which is a ring flow sensor (PCP) - using a method belonging to the group of thermal mass measurements. The principle of operation of the device is based on the dependence of the value of the selected parameter, the time constant of the temperature sensor, the water flow stream and the thickness of the rock deposit. The proposed solution is characterized by a simple design and measurement of only one value, in this case the course of temperature changes over time. On this basis, the thickness of the scale deposit layer is determined, and then the flow of water is determined. The conceptual assumptions were verified using prepared computational models and then performed experimental measurements. The influence of the PCP installation location on potential measurement errors was also analyzed. Tables of the dependence of the time constant on the thickness of the rock sediment and the flow stream were developed. Parametric calculations were performed for the numerical model and the physical modeling scheme. The obtained results made it possible to propose a PCP design solution. Initial conditions for optimizing the proposed solution were discussed. The obtained results and conclusions from the conducted research may constitute the basis for further development work and theoretical analyzes on the presented issue.

## **Spis rysunków**

Rys. 2.1. Widok obrazu z mikroskopu skaningowego próbki osadu węglanu wapnia w przekroju poprzecznym rury a), c) i wzdłużnym rury b), d) [39] .....	13
Rys. 2.2. Widok przekroju poprzecznego rury: a) z osadem kamiennym, b) po usunięciu osadu kamiennego .....	14
Rys. 2.3. Przepływomierz turbinowy: a) schemat zasady działania, b) widok urządzenia [65] .....	16
Rys. 2.4. Przepływomierz tarczowy: a) schemat zasady działania, b) widok urządzenia [66] .....	16
Rys. 2.5. Przepływomierz owalno-zębaty: a) schemat zasady działania, b) widok urządzenia [67] .....	17
Rys. 2.6. Przepływomierz tłokowy: a) przekrój urządzenia z elementami składowymi, b) widok urządzenia [68].....	18
Rys. 2.7. Przepływomierz pływakowy (rotometr): a) schemat zasady działania, b) widok urządzenia [69].....	18
Rys. 2.8. Przepływomierz wirowy: a) przekrój urządzenia, b) widok urządzenia [70] .....	19
Rys. 2.9. Przepływomierz ultradźwiękowy: a) zasada działania, b) widok urządzenia [71] ..	19
Rys. 2.10. Przepływomierz elektromagnetyczny: a) schemat zasady działania, b) widok urządzenia [72].....	20
Rys. 2.11. Przepływomierz Coriolisa: a) schemat zasady działania, b) widok urządzenia [73] .....	21
Rys. 2.12. Przepływomierz tłokowo-pierścieniowy: a) schemat zasady działania, b) widok urządzenia [74].....	21
Rys. 2.13. Termiczny przepływomierz masowy T 150 firmy Endress+Hauser: a) widok zasady działania, b) widok urządzenia [75] .....	22
Rys. 2.14. Termiczny przepływomierz masowy SDN 550: a) schemat konstrukcyjny z krzywą kalibracji, b) widok urządzenia [79] .....	23
Rys. 2.15. Model obrazujący sposób działania przepływomierza termicznego [75] .....	24
Rys. 2.16. Widok natężenia przepływu w armaturze domowej: a) minimalny, b) maksymalny. Zakres przepływu w granicach od 0.05 kg/s do 0.3 kg/s .....	24
Rys. 3.1. Widok fragmentów przepływomierzy zniszczonych przez osad kamienny.....	25

Rys. 3.2. Charakterystyka wpływu grubości osadu kamiennego na wartość stałej czasowej podczas nagrzewania i chłodzenia czujnika temperatury: 1) stała czasowa czujnika bez osadu kamiennego („czysty”), 2) różnica stałych czasowych czujnika bez osadu i z osadem kamiennym .....	28
Rys. 3.3. Schemat konstrukcji termicznych przepływomierzy masowych: a) typowe rozwiązanie, b) rozwiązanie wyposażone w PCP - pierścieniowy czujnik przepływu.....	29
Rys. 3.4. Schemat poglądowej sieci IoT z grupą urządzeń wyposażoną w PCP .....	29
Rys. 3.5. Charakterystyka zależności strumienia masowego od stałej czasowej dla różnych grubości osadu kamiennego; (1) brak osadu kamiennego, (2), (3) z osadem kamiennym .....	30
Rys. 3.6. Widok rozkładów prędkości w ruchu laminarnym i turbulentnym (strzałkami zaznaczono obszar oddziaływania PCP) [104], [105].....	31
Rys. 3.7. Charakterystyka dynamiczna czujnika temperatury: a) przebieg czasowy temperatury mierzonej, b) przebieg temperatury wskazywanej przez czujnik rezystancyjny (tcz – temperatura czujnika).....	34
Rys. 3.8. Charakterystyka stałej czasowej w przypadku przebiegu czasowym temperatury malejącej .....	34
Rys. 4.1. Zależność funkcjonalna stosowanych narzędzi badawczych.....	39
Rys. 5.1. Widok domen obliczeniowych: a) wersja prosta, b) wersja do analizy wpływu miejsca montażu, c) siatka obliczeniowa dla wersji prostej, d) siatka obliczeniowa dla wersji do analizy wpływu miejsca montażu .....	42
Rys. 5.2. Charakterystyki wpływu wielkości siatki obliczeniowej na wynik pomiaru.....	44
Rys. 5.3. Widok przyjętego do obliczeń wycinka kanału o kącie 45° .....	45
Rys. 5.4. Analiza wpływu kroku czasowego na wynik obliczeń .....	45
Rys. 5.5. a) Widok siatki modelu obliczeniowego w programie Ansys CFX, b) Widok siatki w przekroju modelu obliczeniowego w programie Ansys CFX .....	46
Rys. 5.6. Charakterystyki zależności liczby Reynoldsa i strumienia od stałej czasowej ....	48
Rys. 6.1. Schemat poglądowy modelu zawierającego system pomiaru przepływu odporny na środowisko wody twardej.....	49
Rys. 6.2. Widok głównych elementów składowych modelu.....	52
Rys. 6.3. Charakterystyka właściwości fizycznych wody [132] .....	53
Rys. 7.1. Widok stanowiska pomiarowego: a) zbiornik, b) pompa obiegowa, c) naczynie przeponowe, d) widok ogólny, e) miejsce montażu czujnika .....	59
Rys. 7.2. Widok prototypu PCP .....	60



Rys. 7.3.a) Widok prototypu urządzenia pomiarowego zamontowany na stanowisku pomiarowym, b) Widok czterokanałowego miernika temperatury YC-747UD .....	61
Rys. 7.4. Piec kalibracyjny Fluke® 9142, a) Widok, b) Certyfikat kalibracji .....	61
Rys. 7.5. Widok grzałki opaskowej .....	62
Rys. 7.6 a-g. Wybrane charakterystyki czasowo-temperaturowe chłodzenia PCP bez warstwy izolacji .....	63
Rys. 7.7 a-g. Wybrane charakterystyki czasowo-temperaturowe chłodzenia PCP z warstwą izolacji .....	64
Rys. 7.8. Charakterystyki wynikowe dla pomiarów wykonanych w warunkach bez i z symulacją warstwy osadu kamiennego .....	65
Rys. 7.9. Charakterystyka zależności stałej czasowej od natężenia przepływu po kalibracji modelu dla pomiarów rzeczywistych. Charakterystyka modelu oznaczona jest kolorem pomarańczowym, wyniki pomiarów oznaczono kolorem niebieskim .....	66
Rys. 8.1. Charakterystyka pracy czujnika; (1) krzywa nagrzewania, (2) poziom odniesienia (np. 0.632 stanu ustalonego), (3) wynik pomiaru (stała czasowa), (4) krzywa chłodzenia .....	67
Rys. 8.2. Widok faz pracy czujnika (a,b,c,d,e,f). Widoczne nierównomierne warunki chłodzenia kolejnych przekrojów w kierunku przepływu .....	68
Rys. 8.3. Charakterystyka wpływu poziomu wartości temperatury wejściowej i ich różnicy na pomiar stałej czasowej: a) dla temperatury wody w zakresie 280K do 360K, b) przybliżenie dla jednej wybranej wartości temperatury (czerwonej ramce oznaczono punkty detekcji stałej czasowej, niezależnie od skoku temperatury stała czasowa jest identyczna) .....	70
Rys. 8.4. Charakterystyka zmiany temperatury PCP w czasie po wymuszonym skoku temperatury, poziom temperatury 300K .....	71
Rys. 8.5. Cykl (kolejność) postępowania w pomiarach .....	73
Rys. 8.6. Stałe czasowe dla różnych grubości osadu wyrażonego w K/W .....	75
Rys. 8.7. Charakterystyka zależności stałych czasowych od strumienia przepływu oraz grubości osadu kamiennego .....	75
Rys. 8.8. Charakterystyka błędów pomiaru grubości osadu oraz przepływu wynikające interpolacji .....	76
Rys. 8.9. Założony strumień, stała czasowa odczytana z wykresu, stała czasowa odczytana z pomiaru .....	77
Rys. 8.10. Charakterystyka pokazująca granice technologiczne dla liczby Reynoldsa .....	78
Rys. 8.11. Charakterystyka początkowego rozkładu temperatury: a) negatywny wpływ procesu nagrzewania, b) brak wpływu procesu nagrzewania .....	79

Rys. 8.12. Charakterystyka przegrzania czujnika.....	79
Rys. 8.13. Model 3D PCP: a) konstrukcja czujnika z izolacją termiczną i wyprowadzeniem połączeń elektrycznych czujnika, b) przekrój poprzeczny czujnika, z widocznymi kapilarami . .....	81
Rys. 8.14. Model 3D PCP: a) przekrój wzdłużny czujnika z widocznym drutem platynowym wtopionym w szkło i gniazdo uszczelnienia hydraulicznego, b) element czynny zatopiony w szkle miękkim – czujnik.....	81
Rys. 8.15. Model 3D elementu aktywnego (rezystor drutowy) - drut platynowy w kształcie bifilarnym: a) cały rezystor, b) wyjścia czynne .....	82
Rys. 8.16. Model 3D izolatora termicznego (obudowa zewnętrzna z rowkami) .....	82
Rys. 8.17. Model 3D urządzenia: a) widok w całości, b) przekrój (zachowana geometria kanału przepływowego) .....	83
Rys. 9.1. Wybrana charakterystyka przyrządu z widoczną silną nieliniowością.....	85
Rys. 9.2. Analiza optymalizacji czasu pomiaru oraz długości i masy czujnika; (1) całkowita długość strumienia biorąca udział w pomiarze, (2) strumień wewnątrz pierścienia pomiarowego, (3) strumień którego czas przebywania w strefie pomiaru jest stały, (4) strumień który w chwili zakończenia pomiaru będzie się znajdował wewnątrz czujnika, (5) wpływ nagrzewania na stałą czasową.....	88
Rys. 9.3.a) Parametry dobrane optymalnie, dominująca część strumienia znajduje się identyczny czas w strefie pomiaru, minimalne oddziaływanie fazy nagrzewania; b) parametry graniczne gdzie strumień w czasie pomiaru przesunie się o długość czujnika; c) niekorzystne parametry gdy strumień nie opuści strefy pomiaru, wówczas niekorzystnie wpływa proces nagrzewania (pierwsza faza pomiaru) na wynik .....	89
Rys. 9.4. Profil prędkości przy przepływie laminarnym i prawdopodobne przypadki oddziaływania wyodrębnionej porcji wody na przepływomierz.....	90
Rys. 9.5. Przekrój na wylocie z pierścienia pomiarowego, kolorem zielonym zaznaczono obszary optymalnych prędkości pomiaru dla różnych wartości stałej czasowej (asymetria wywołana deformacją profilu prędkości za kolankiem) .....	90
Rys. 9.6. Asymetria rozkładu temperatury w przypadku montażu pierścienia pomiarowego za kolankiem .....	91
Rys. 9.7. Obszar zmienionego profilu prędkości.....	92
Rys. 9.8. Wpływ długości odcinka prostoliniowego na pomiar stałej czasowej, strumień: a) 0.01 kg/s, b) 0.3 kg/s .....	93
Rys. 10.1. Ilustracja przepływu laminarnego, przejściowego i turbulentnego.....	95

## **Spis tabel**

Tab. 5.1. Rezultaty dla przygotowanych siatek .....	43
Tab. 5.2. Rezultaty analizy wpływu wybranego modelu turbulencji.....	44
Tab. 5.3. Wyniki obliczeń: Liczba Re, strumień i stała czasowa dla wybranych punktów obliczeniowych.....	47
Tab. 6.1. Podstawowe bloki, wykorzystane w modelu fizycznym MatLab-Simulink .....	54
Tab. 6.2. Równania zachowania pędu dla każdej połowy rury .....	56
Tab. 6.3. Równania utraty ciśnienia w wyniku lepkości dla każdej połowy rury .....	56

## **Załącznik 1**

### *Gospodarka wodna:*

#### ➤ Zasoby wodne

Powszechnie uznaje się, że wiele krajów na całym świecie boryka się z poważnymi wyzwaniami w dostępie do czystej wody pitnej. Tylko 3% zasobów wodnych na świecie to woda słodka, z czego 70% znajduje się w zamrożonych lodowcach, pozostawiając około 1% zasobów jako dostępne do spożycia przez ludzi. Obecnie ponad miliard ludzi nie ma dostępu do czystej wody pitnej. Prognozy wskazują, że do 2050 roku co najmniej jedna na cztery osoby zamieszka w krajach borykających się z chronicznymi lub powtarzającymi się niedoborami wody [2], [3]. Brak podstawowych warunków sanitarnych dotyka obecnie 1 - 2,3 miliarda ludzi [4]. Należy zauważyć, że obecnie 90% klęsk żywiołowych jest związanych z wodą, a zapotrzebowanie na czystą wodę stale rośnie [5], [6], [7]. Ten wzrost popytu można przypisać kilku czynnikom, w tym rosnącej liczbie ludności na świecie, która ma osiągnąć 9 miliardów do 2050 roku (z obecnych 8 miliardów), poprawie standardów życia w krajach rozwiniętych i zwiększonemu konsumpcjonizmowi [8]. Przykładowo przemysł produkcji żywności znacząco przyczynia się do rosnącego zapotrzebowania na wodę [3].

#### ➤ Rozwiązania minimalizujące zużycie i pobór wody

Podjęmowana problematyka w aspekcie wdrożeniowym znajduje miejsce w obszarach zarówno lokalnych jak i globalnych innowacji nie tylko pomiarów, ale ogólniej wszelkich rozwiązań przyczyniających się do poprawy efektywności gospodarowania zasobami wodnymi. Ogólnoświatowy problem niskiej dostępności słodkiej wody wymaga rozwiązań, które powinny być poszukiwane na poziomie lokalnym. W ciągu 10 lat światowa populacja wzrośnie do około 8,5 miliarda ludzi. Jeśli 5% z nich będzie korzystać z systemu recyklingu wody w swoich domach, to całkowite zużycie wody nie wzrośnie. Wprowadzenie innych rozwiązań również przyczyni się do zmniejszenia zużycia wody, pomimo wzrostu liczby ludności [9]. Niżej przedstawiono przykładowe innowacyjne rozwiązania mogące zostać wdrożone zarówno lokalnie jak i globalnie.

- Woda w atmosferze

Istnieją urządzenia pozwalające pozyskiwać wodę z atmosfery. Jeden metr sześcienny powietrza o temperaturze 25°C może zawierać do 23 g wody (maksymalna wilgotność). Chłodzenie powietrzem zmniejsza ilość wody w powietrzu, ale nie zawsze jest to proporcjonalne do wzrostu temperatury. Na obszarach pustynnych wilgotność powietrza może wahać się od około 8% w ciągu dnia do 40% w nocy. Mimo tak skrajnie niskiej wilgotności powietrza urządzenie jest w stanie uzyskać 200–250 ml wody pitnej w ciągu 24 godzin. Takie rozwiązania sprawdzają się szczególnie na terenach podmokłych o słabym dostępie do wody pitnej lub zabudowie terenów niezamieszkałych lub suchych. Pozyskiwanie wody z atmosfery może być elementem rozwoju nowych miast i siedlisk ludzkich, w których zastosowane zostaną nowoczesne rozwiązania, takie jak substytut gleby z odpadów czy wykorzystanie Odnawialnych Źródeł Energii (OZE) [10], [11].

- Woda w idei czystszej produkcji

Czystsza produkcja (CP) to przede wszystkim projektowanie, zarządzanie i kontrolowanie produkcji w celu zminimalizowania powstawania zanieczyszczeń. Ideą CP jest sprzeciw wobec gospodarki linearnej i wspieranie produkcji bezodpadowej. Wdrożenie CP jest etapem przygotowań do certyfikacji systemu zarządzania środowiskowego według normy EN-ISO 14 001:1996 [12]. Przykładem CP jest ekoinnowacja produktowa lub procesowa. Obiegi zamknięte w instalacjach przemysłowych wiążą się z rozsądniejszym gospodarowaniem zasobami naturalnymi, w tym wody, jak również oszczędnościami finansowymi [13], [14].

- Instalacja dualna

Instalacja dualna to proste rozwiązanie wykorzystujące dodatkowe elementy instalacji sanitarnej w gospodarstwie domowym. Instalacja dualna pozwala konsumentowi na pobranie wody np. z kąpeli czy mycia rąk i ponowne wykorzystanie jej np. do spłukiwania ścieków. Podstawowe rozwiązanie służy do magazynowania wody. Istnieje jednak możliwość rozbudowy takiej instalacji o dodatkowe elementy, takie jak filtry. System dualny ma wiele zalet. Między innymi wpływa na obniżenie rachunków oraz zużycie zasobów naturalnych. Zmniejsza również zanieczyszczenie dróg wodnych [15], [16]. Koszt instalacji dualnej i jej utrzymanie są wciąż wysokie, co jest jedną z głównych wad tego rozwiązania [17], [18].

- Infrastruktura retencyjna

Zbiorniki retencyjne służą do zatrzymywania i magazynowania wody podczas opadów atmosferycznych. Znacząco zmniejszają ryzyko suszy i powodzi [20]. W Polsce brakuje zbiorników retencyjnych i innej infrastruktury do gromadzenia wody, np. stawów. Dlatego mimo obfitych opadów, Polska boryka się z suszą i powodziami. Wały przeciwpowodziowe są rozwiązaniem dla małych i średnich powodzi oraz dają możliwość wydłużenia czasu ewakuacji. Powodują również szybsze podnoszenie się i odpływ wody w korytach rzek. Budowa zbiorników retencyjnych zmniejszyłaby uszkodzenia oraz ograniczyła straty infrastrukturalne [18]. Budowa zbiorników retencyjnych chroni również przed zanieczyszczeniem udostępnianej czystej wody. Woda nagromadzona podczas powodzi występujących głównie na terenach zamieszkałych lub uprzemysłowionych wypłukuje zanieczyszczenia, przedostając się do środowiska w sposób niekontrolowany, powodując ich transport z ciekami wodnymi [18], [19].

- Pomiar zużycia wody jako niezbędny element racjonalnego gospodarowania zasobami

Prawidłowy pomiar zużycia wody może wpływać pośrednio i bezpośrednio na racjonalne wykorzystanie tego zasobu. Dzięki prawidłowemu pomiarowi wody możliwe jest szybkie zdiagnozowanie ewentualnej usterki w sieci wodociągowej lub instalacji hydraulicznej. Pozwala na monitorowanie kosztów związanych z wykorzystaniem lub wyciekami wody [20]. Przedstawiona technologia w niniejszej pracy i przewidywany jej rozwój mogą pozwolić na pozyskiwanie danych pomiarowych w czasie rzeczywistym. Pozwoliłoby to na odpowiedzialne gospodarowanie zasobami wodnymi i umożliwiłoby regularną kontrolę wydajności. Działania te przyczyniłyby się również do zmniejszenia awaryjności urządzeń i szybszego wykrywania nieszczelności [21], [22], [23]. Często usuwanie wycieków jest nieopłacalne ekonomicznie ze względu na trudność w ustaleniu miejsca nieszczelności [24], [25], [26].

- Inteligentny system pomiarowy

Jednym z rozwiązań jest inteligentny system pomiarowy Advanced Metering Infrastructure (AMI) wspierany przez Parlament Europejski [27], [28]. Pozwala na zdalną dwukierunkową komunikację z systemem zbierania danych o wykorzystaniu danych mediów np. wody. Właściwy bilans wodny w sieci jest podstawą nowoczesnych systemów wodociągowych, ale wymaga rzetelnej informacji o wszystkich procesach. Cykliczne pomiary bez ingerencji człowieka, czyli w pełni zautomatyzowany, zdalny sposób, wyeliminowałby problemy z siecią wodociągową, takie jak wykrywanie wycieków [29]. Dokładne pomiary

pozwalają również na określenie profili zużycia wody, które charakteryzują się roczną, sezonową, miesięczną, tygodniową, dobową, godzinową zmiennością w czasie. Profile te, poprzez współczynnik nieregularności, pozwalają na efektywniejsze projektowanie instalacji sanitarnych.

- Sieci zaopatrzenia w czystą wodę

W celu utrzymania dobrej jakości wody niezbędne jest oczyszczanie rur oraz odkażanie wody, np. w celu usunięcia lub zapobieganiu namnażania bakterii Legionella [30], [31]. Czyszczenie rur z osadów zapobiega również niszczeniu elementów sieci, których wymiana wiąże się ze stratami wody, wzrostem ilości odpadów oraz skróceniem cyklu życia elementów [32], [33]. Istnieją różne metody czyszczenia rur, od metalowych gąbek lub innych nowoczesnych urządzeń czyszczących po technologie takie jak ice-pigging. Ice-pigging polega na czyszczeniu rur kruszonym lodem; zaletą jest mała inwazyjność, natomiast wadą jest ilość generowanych odpadów, równa objętości czyszczonych rurociągów. W takim przypadku istotne jest opracowanie innych metod oczyszczania powstałej cieczy oraz racjonalne gospodarowanie zanieczyszczeniami [34].

- Domowa oczyszczalnia wody

Kreowanie i nagłaśnianie proekologicznych zachowań i rozwiązań może przyczynić się do zaoszczędzenia tysięcy litrów wody [35]. Istnieją rozwiązania wspierające gospodarkę wodną na poziomie gospodarstw domowych [36]. Jednym z nich jest Hydraloop (system recyklingu wody), urządzenie, które oczyszcza zużytą wodę i pozwala na recykling nawet do 85% w gospodarstwie domowym. Wykorzystuje sedymentację, flotację, flotację rozpuszczonego powietrza i oczyszczanie biologiczne do oczyszczania wody. Rozwiązanie o komercyjnej nazwie Hydraloop pozwala zaoszczędzić średnio 30 000 litrów wody rocznie w gospodarstwie domowym. Oczyszczona woda nadaje się do sprzątania domu, spłukiwania toalety czy podlewania ogrodu (Innovative Water Recycling System, Hydraloop International, n.d.) [38].

## Załącznik 2

### Wykonane autorskie kody źródłowe

Kod do przygotowania tabel pomiarowych – modelowanie przepływów, Ten kod wykorzystuje model simscape

```

wyn=start()
[tabPrzep tabPrzep0]=tabelaPrzeplywu(wyn);
%testStalejCzas()

rys01(wyn(1).wp(4).wynT)
rys02(wyn(1).wp(4).wynT)
rys03(wyn)
rys04(wyn)

%%
function testStalejCzas()
global sPar
sPar.aaDataCzas=datetetime();
sPar.aaNazwaModelu="sysCharakterystyki05.slx";

sPar.otwarcieZaw=-9; % -9-V=0; -0.1-reg, 0.6-V=max;
sPar.cisnSieci=6;
sPar.delKamienia=0;

aaa=open(sPar.aaNazwaModelu);
figure(100)
ttemp=[280:20:360];licz=0;liczMax=size(ttemp,2);
for tt=ttemp
    licz=licz+1;
    sPar.tempIni=ttemp(licz);

    for ii=1:2:10
        sPar.tempDelWym=ii;
        out=symulacja(sPar.aaNazwaModelu);
        strum=median(out.strumienV);
        w=oblicz1(out,sPar);
        Re=median(w.out.Reynolds.data);
        plot(w.out.wyn1); hold on
        wStcz=sPar.tempIni-(sPar.tempDelWym)*(1-0.632);
        jj=szukajPrzeciecia(w.out.wyn1,wStcz);
        plot([6 15],[wStcz wStcz],LineStyle='-');
        plot(w.out.wyn1.time(jj),wStcz,'o',LineWidth=2)
        stCzas=w.out.scz1(1);
        w.out.wyn2.Time=w.out.wyn2.Time-
        sPar.czasNagrzStart+sPar.czasZmianaTempWody;
        plot(w.out.wyn2);
        wStcz=sPar.tempIni+(sPar.tempDelWym)*(1-0.632);
        plot([6 15],[wStcz wStcz],LineStyle='-');
        jj=szukajPrzeciecia(w.out.wyn2,wStcz);
        plot(w.out.wyn2.time(jj),wStcz,'o',LineWidth=2)
    end
    opis(strum,stCzas,licz,liczMax);
end
plot([7 7],[270 370],LineStyle="-")
grid on

function opis(strum,stCzas,licz,liczMax,w)
    t=sPar.tempIni;y=licz/liczMax/3-0.05;
    %dim=[0.5637 0.5172 0.1036+y 0.0340+y];
    dim=[0.4637 0.4172 0.1036+y 0.0340+y];
    an=annotation('textbox','dim','String',{sprintf('sV=%0.5f    l/min,
    T=%0.1f K, scz=%0.4f s',strum*60,t,stCzas)},...
    'LineStyle','none','FitBoxToText','on');
end

function rys02(wyn)
figure(2)
for ii=1:size(wyn,2)
    rys021(wyn(ii).wOut);
end
%%-----
function rys021(w)
for ii=1:size(w,2)
    subplot(3,1,1); hold on; grid on;
    plot(w(ii).out.bezKamieniaT);
    plot(w(ii).out.zKamieniemT);
    subplot(3,1,2); hold on; grid on;
    plot(w(ii).out.wyn1);
    subplot(3,1,3); hold on; grid on;
    plot(w(ii).out.wyn2);
end
subplot(3,1,1)
title(rysTytul(w(1).out,""));
subplot(3,1,2)
title(rysTytul(w(1).out,""));
subplot(3,1,3)
title(rysTytul(w(1).out,""));
end
end

%%-----
function rys01(wyn)
figure(1)
subplot(3,1,1)
for ii=1:size(wyn,2)
    [grStalCzas,grStrumY,grDelKam,lRe]=rysujDt(wyn(ii).wOut);
    x(ii,:)=grStalCzas;
    z(ii,:)=grStrumY;
    y(ii,:)=grDelKam;
    Re(ii,:)=lRe;
end
cTXT=sprintf('kam=                                %0.1f-%0.1f
K/W',min(min(y)),max(max(y)));
title(rysTytul(wyn(1).wOut(1).out,cTXT))
subplot(3,1,2)
surf(x,y,z);
xlabel('strum, kg/s')
ylabel('st.czas, s')
ylabel('osad, K/W')
title(rysTytul(wyn(1).wOut(1).out,cTXT));
subplot(3,1,3)
surf(x,y,Re);
title(rysTytul(wyn(1).wOut(1).out,cTXT));
xlabel('Re')
ylabel('st.czas, s')
ylabel('osad, K/W')
end
%%-----
function cTyt=rysTytul(out,cTXT)
cP=out.sPar.cisnSieci;
cT=out.sPar.tempIni;
cTyt=sprintf('cisn=%0.1f bar, temp=%0.1f K, %s',cP,cT,cTXT);
end
%%-----
function [stalCzas,strumY,delKam,lRe]=rysujDt(w)

```



<pre>function jj=szukajPrzeciecia(p,wart) w1=p; w2=p; w2.data=w2.data*0+wart; for ii=1:1:size(w1.Data) mm(ii)=abs(abs(w1.data(ii))-abs(w2.data(ii))); end % figure(12) % plot(w1.data); hold on % plot(mm); hold on % [jj, x,y]=intersect(w1.data,w2.data,"rows"); [m,jj]=min(mm); end end  %%% function [mKamPrzyrzad mKamPrzyrzad0]=tabelaPrzeplewy(wyn) licz=0;licz0=0; for ii=1:1:size(wyn,2) % cisnienie wCis=wyn(ii).wp; for jj=1:1:size(wCis,2) wT=wCis(jj).wynT; for kk=1:1:size(wT,2) wOt=wT(kk).wOut; for hh=1:1:size(wOt,2) out=wyn(ii).wp(jj).wynT(kk).wOut(hh).out; % subplot(1,2,1); hold on; % plot(out.Reynolds) % subplot(1,2,2); hold on; % plot(out.predkPrzeplewy) licz=licz+1; % newOut(licz).out=out; mKamPrzyrzad(licz).Re=median(out.Reynolds.data); mKamPrzyrzad(licz).Pr=median(out.Prandtl.data); mKamPrzyrzad(licz).tempIni=out.sPar.tempIni; mKamPrzyrzad(licz).delKamienia=out.sPar.delKamienia; mKamPrzyrzad(licz).cislSieci=out.sPar.cislSieci; mKamPrzyrzad(licz).strumienV=median(out.strumienV);%l/s  mKamPrzyrzad(licz).predkPrzeplewy=median(out.predkPrzeplewy);% m/s mKamPrzyrzad(licz).scz1=out.scz1(1); mKamPrzyrzad(licz).scz2=out.scz2(1); mKamPrzyrzad(licz).czujPoleZKam=out.sPar.czujPoleZKam; mKamPrzyrzad(licz).otwarcieZaw=out.sPar.otwarcieZaw; mKamPrzyrzad(licz).sPar=out.sPar; if hh==1 licz0=licz0+1; mKamPrzyrzad0(licz0).Re=median(out.Reynolds.data); mKamPrzyrzad0(licz0).Pr=median(out.Prandtl.data); mKamPrzyrzad0(licz0).delKamienia=out.sPar.delKamienia; mKamPrzyrzad0(licz0).cislSieci=out.sPar.cislSieci; mKamPrzyrzad0(licz0).tempIni=out.sPar.tempIni;  mKamPrzyrzad0(licz0).strumienV=median(out.strumienV);%l/s  mKamPrzyrzad0(licz0).czujPoleZKam=out.sPar.czujPoleZKam; mKamPrzyrzad0(licz0).scz1=out.scz1(1); mKamPrzyrzad0(licz0).scz2=out.scz2(1);  mKamPrzyrzad0(licz0).czujPoleZKam=out.sPar.czujPoleZKam; mKamPrzyrzad0(licz0).otwarcieZaw=out.sPar.otwarcieZaw; mKamPrzyrzad0(licz0).sPar=out.sPar; end end end end end % figure(50) % subplot(1,2,1); % xlabel('czas, s') % ylabel('Re'); grid on; % subplot(1,2,2); % ylabel('v, m/s'); grid on; % xlabel('czas, s') % % plot(test);</pre>	<pre>[stalCzas,stromY,delKam,lRe]=rysDt1(w); yyaxis("left") plot(stalCzas,stromY,DisplayName=sprintf('kam, K/W=%0.1f',delKam(1))); xlabel('stała czasowa, s');ylabel('przepływ, kg/s'); yyaxis("right") plot(stalCzas,lRe); ylabel('Re');  hold on; grid on; legend end %% ----- function [stalCzas,stromY,delKam,lRe]=rysDt1(w) ileSym=size(w,2); for ii=1:1:ileSym out=w(ii).out; stromY(ii)=median(out.strumienV); stalCzas(ii)=(out.scz1(1)+out.scz2(1))/2; delKam(ii)=out.sPar.delKamienia; lRe(ii)=median(out.Reynolds.data); end end  %% ----- function wynDet=obliczenia(tempIni) global sPar sPar.aaDataCzas=datetime(); sPar.aaNazwaModelu="sysCharakterystyki05.slx"; aaa=open(sPar.aaNazwaModelu);  sPar.tempIni=tempIni; % sPar.delKamienia=0; jjMax=20; delKamMax=2;% bylo 30, K/W delkam=[0:delKamMax/jjMax:delKamMax];  for jj=1:1:jjMax sPar.delKamienia=delkam(jj);  % tabela poziomów otwarcia zaworu otwP=-7;otwK=0.6; % otwarcie poczatk i koncowe iiMax=30; % bylo 40 % sPar.otwarcieZaw=-0.25; otwZaw=[0:(otwK)/(iiMax-10-1):otwK]; otwZawP=[-7 -6 -5 -4 -3 -2 -1 -0.5 -0.2 -0.1] [otwZaw];% zadeklarowane poziomy otwarcia zaworu  for ii=1:1:iiMax sPar.otwarcieZaw=otwZawP(ii); out=symulacja(sPar.aaNazwaModelu); wOut11(ii)=oblicz1(out,sPar); end  fprintf('grubosc kamienia...%d/%d\n',jj,jjMax) wynDet(jj).wOut=wOut11; wynDet(jj).delKamienia=sPar.delKamienia; end end  function wOut=oblicz1(out,sPar) wyn=zmianaRes(out.zKamieniemT,0.002); % wyn=out.zKamieniemT; wyn1=wynn(wyn, sPar.czasZmianaTempWody+0.1,sPar.czasNagrzStart-0.1); scz1=stalaCzas(wyn1);  % wyn2=wynn(wyn,sPar.czasNagrzStart+sPar.czasNagrzDlugo sc-1,80);  wyn2=wynn(wyn,sPar.czasNagrzStart+sPar.czasNagrzDlugosc -1,75.8); scz2=stalaCzas2(wyn2); wOut.out=out; wOut.out.wyn1=zmianaRes(wyn1,0.05); wOut.out.wyn2=zmianaRes(wyn2,0.05); wOut.out.scz1=scz1;</pre>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<pre> end function wyn=genOut(out)  end %% %  function rys04(wyn) %stała czasowa dla parametrów zerowych (strumień=0, kamień=0) figure(40) licz=0; iCisn=size(wyn,2); for ii=1:1:iCisn %cisnienie for jj=1:1:size(wyn(ii).wp,2) %temperatura licz=0;sc1=0;sc2=0;gkam=0; for iKam=1:1:size(wyn(ii).wp(ii).wynT,2) licz=licz+1; sc1(licz)=wyn(ii).wp(jj).wynT(iKam).wOut(1).out.scz1(1); sc2(licz)=wyn(ii).wp(jj).wynT(iKam).wOut(1).out.scz2(1); gkam(licz)=wyn(ii).wp(jj).wynT(iKam).delKamienia; end subplot(iCisn,1,ii) hold on; cisn=wyn(ii).cisnSieci;temp=wyn(ii).wp(jj).tempIni; plot(sc2,gkam,DisplayName=sprintf('T=%0.1f K',temp)) end end for ii=1:1:iCisn %cisnienie subplot(iCisn,1,ii); grid on; legend title(sprintf('p=%0.1f bar',wyn(ii).cisnSieci)) xlabel('stała czasowa, s'); ylabel('grubość osadu, K/W') end end  % function wyn1=kasujZbedneDane(wyn) % %stała czasowa dla parametrów zerowych (strumień=0, kamień=0) % figure(40) % licz=0; % for ii=1:1:size(wyn,2) %cisnienie % wCis=wyn(ii).wp; % for jj=1:1:size(wCis,2) % wT=wCis(jj).wynT; % for kk=1:1:size(wT) % wOt=wT(kk).wOut; % for hh=1:1:size(wOt,2) % out=wOt(hh).out; % licz=licz+1; % test(licz)=out.scz1; % end % end % end % end % plot(test); % end  function w=start() global sPar ob_out dtPocz=datetime() pPocz=1.1;pKon=6; pKrokMax=5; if pKon&gt;pPocz cisnSieci=[pPocz:(pKon-pPocz)/(pKrokMax-1):pKon]; else cisnSieci=pKon;pKrokMax=1; end % sPar.cisnSieci=pPocz;% bar for ip=1:1:pKrokMax sPar.cisnSieci=cisnSieci(ip); fprintf('cisnienie...%d/%d\n',ip,pKrokMax) wyn(ip).wp=startTemp(); wyn(ip).cisnSieci=sPar.cisnSieci; wyn(ip).ob_out=ob_out; end w=wyn; dtKon=datetime() czasObliczen=dtKon-dtPocz </pre>	<pre> wOut.out.scz2=scz2; % wOut.out.scz1k=scz1k; % wOut.out.scz2k=scz2k; wOut.out.sPar=sPar; wOut.otwZaworu=sPar.otwarcieZaw; % figure(111); plot(wyn);hold on; plot(wyn1); plot(wyn2); grid on end  function wy1=symulacja(cModel) global sPar ob_out wy=sim(cModel); ob_out=wy; wy1.bezKamieniaT=wy.bezKamieniaT; % wy1.logout=";% wy.logout; wy1.strumienM=wy.strumienM; wy1.strumienV=wy.strumienV; % wy1.tout=";% wy.tout; wy1.zKamieniemT=wy.zKamieniemT; wy1.Reynolds=wy.Reynolds; wy1.Prandtl=wy.Prandtl; wy1.predkPrzeplyw=wy.predkPrzeplyw; % wy1.SimulationMetadata=";% wy.SimulationMetadata; % wy1.ErrorMessage=wy.ErrorMessage; % disp(sPar) end  function scz2=stalaCzas2(seria) seria=odwrocWykres(seria); scz2=stalaCzas(seria); end  function wynS=odwrocWykres(seria) dl=length(seria.data); sredP=mean(seria.data(1:50)); sredK=mean(seria.data(dl-50:dl)); ds=seria.data; for ii=1:1:dl ds(ii)=sredK-(ds(ii)-sredK); end seria.data=ds; wynS=seria; end  function sbSer=wytnij(seria, czP,czK) test=czK-czP; licz1=1; while seria.Time(licz1)&lt;czP licz1=licz1+1; %indeks początku podzbioru do analizy end licz2=licz1; while seria.Time(licz2)&lt;czK licz2=licz2+1; %indeks końca podzbioru do analizy end sbSer=getsamples(seria,licz1:1:licz2); end  function wynik=stalaCzas(sbSer) idPocz=szukajPocz(sbSer); idKon=szukajKon(sbSer); sbStCzas=getsamples(sbSer,idPocz:1:idKon); dlug=length(sbStCzas.data)-5; wskazPocz=mean(sbStCzas.data(1:5)); wskazKonc=mean(sbStCzas.data(dlug:dlug+5)); pozStCzas=wskazPocz+0.632*(wskazKonc-wskazPocz); % pozStCzas=wskazPocz+0.75*(wskazKonc-wskazPocz); licz=1; while sbStCzas.data(licz)&lt;pozStCzas licz=licz+1; end wynik(1)=sbStCzas.Time(licz)-sbStCzas.Time(1);  % sbStCzas1=getsamples(sbStCzas,licz:1:size(sbStCzas.data,1)); wynik(2)=stalaCzas2rodz(sbStCzas); </pre>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<pre> end  function obl=startTemp() tempIniMin=280;tempIniMax=360;%temperatura wody iTMax=8;% tempIni=tempIniMin; tempWody=[tempIniMin:(tempIniMax-tempIniMin)/(iTMax-1):tempIniMax]; for iT=1:1:iTMax tempIni=tempWody(iT); fprintf('temperatura...%d/%d\n',iT,iTMax) wyn(iT).wynT=obliczenia(tempIni); wyn(iT).tempIni=tempIni; end obl=wyn; end %%----- function rys03(wyn) figure(30) ile=size(wyn,2); for ii=1:1:ile out=wyn(ii).wp(1).wynT(1).wOut; cTyt=rysTytul(out(1).out,"); [stalCzas,stromY,delKam]=rysDt1(out); plot(stalCzas,stromY,DisplayName=cTyt); hold on; grid on; end cDispNam=sprintf('kam=%0.1f K/W',delKam(1)); xlabel('stała czasowa, s');ylabel('przepływ, kg/s'); title(cDispNam) legend end %%----- </pre>	<pre> wynik(3)=0; end  function wyn=stalaCzas2rodz(sbStCzas) %liczy czas do największego przyrostu % licz=1; % dtp=(sbStCzas.time(11)-sbStCzas.time(1))/10; % for ii=10:1:(size(sbStCzas.data,1)-10) % licz=licz+1; % dt(licz)=licz*dtp; % dy(licz)=(sbStCzas.data(ii+2)+sbStCzas.data(ii+4))/2- (sbStCzas.data(ii-2)+sbStCzas.data(ii-4))/2; % wdy(licz)=dy(licz-1)-dy(licz); % end % [max1,poz1]=max(wdy); % wyn=sbStCzas.time(poz1)-sbStCzas.time(1); % figure(50) % hold on % plot(wdy) wyn=0; end  function poz=szukajKon(seria) poz=length(seria.data)-100;%tu można wpisać procedure poszukiwania end  function poz=szukajPocz(seria) koniec=length(seria.data)-100; licz=0; testAVG=mean(seria.data(1:50)); testAVG1=testAVG; while (licz&lt;koniec) &amp;&amp; (abs(testAVG- testAVG1)/testAVG*100&lt;0.02) testAVG1=mean(seria.data(1+licz:50+licz)); licz=licz+1; end poz=licz; end  function wyn=zmianaRes(dataTS,delx) xmin=min(dataTS.Time); xmax=max(dataTS.Time); %delx=0.001; %s, rozdzielczość w sekundach wyn=resample(dataTS,xmin:delx:xmax); end  function zerujZmiennaOut(wyn) % wyn(1).wp(1).wynT(1).wOut(8).out.SimulationMetadata for ii=1:1:size(wyn,2) end end </pre>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<pre> global sPar glRysuj  glRysuj=0; bledyOblInterp=policzBledyAnalizy(tabPrzep, tabPrzep0)  % [wyn, bl]=mStrumien(0.26, 355,6) % global tabPrzep tabPrzep0 </pre>	<pre> function [Xq,Yq,vq,X,Y,Z]=siatka0(tab0) X(:)=[tab0(:).tempIni].'; Y(:)=[tab0(:).scz1].'; Z(:)=[tab0(:).delKamienia].'; xq1=[280:0.02:360]; yq1=[2:0.005:6]; </pre>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<pre> %pomiar grubości kamienia dla zerowego przepływu temp=302.857;%temperaturę znamy bo jest mierzona %musimy założyć dla jakiej grubości kamienia robimy badania delKam00=0.2;  %pomiar dla zerowego przepływu [pomStrumObl00, zmierzonaStCzas0]=stPomiarStalejCzasPrzeplyw(- 7,temp,delKam00)% -7 oznacza przepływ 0  delKam0=wyznaczGrubKam(tabPrzep0,temp,zmierzonaStCzas0) bladKamien0=abs(delKam00-delKam0)/delKam00*100  %delkam1=grubKamieniaOblicz(t,tabPrzep0); %tu już znamy grubość kamienia z pomiaru stałej czasowej dla strumienia 0 %na stanowisku fizycznym badamy stałą czasową czujnika temperatury przy %przepływie (modelowanie pomiaru na stanowisku) otwZaworu=-0.1 % [-7... 0.6] [pomStrumObl, szczPom]=stPomiarStalejCzasPrzeplyw(otwZaworu,temp,delKam0 );  pomStrumPom=pomiarStrum(tabPrzep,temp,szczPom,delKam0);  %tu znamy druga stałą czasową, grubość kamienia i temperaturę czynnika bladProc = abs((pomStrumObl- pomStrumPom)/pomStrumObl)*100  % [b1,b2]=cyklPomiar(temp,delKam00,otwZaworu,tabPrzep, tabPrzep0)  %% function bledy1=policzBledyAnalizy(tabPrzep, tabPrzep0) global sPar  ttemp=280:10:360; ddelKam=0.01:0.2:3; ootwZaw=-0.5:0.05:0.6; blV=0;blK=0;strV=0;tp=0;dKam=0;  for it=1:size(ttemp,2) temp=ttemp(it); for ik=1:size(ddelKam,2) delKam=ddelKam(ik); for oz=1:size(ootwZaw,2) otwZaworu=ootwZaw(oz); try sprintf('temp=%0.2f kam=%0.2f otw zaw=%0.2f;temp=%0.2f kam=%0.2f otw zaw=%0.2f,it,ik,oz,temp,delKam,otwZaworu) [blV, blK,strV,tp,dKam]=cyklPomiar(temp,delKam,otwZaworu,tabPrze p, tabPrzep0); catch blV=NaN;blK=NaN;strV=NaN;tp=NaN;dKam=NaN; end bledy1(it).blV(ik,oz)=blV; bledy1(it).blK(ik,oz)=blK; bledy1(it).strV(ik,oz)=strV; bledy1(it).tp(ik,oz)=tp; bledy1(it).dKam(ik,oz)=dKam; bledy1(it).otwZaw(ik,oz)=otwZaworu; bledy1(it).delKam(ik,oz)=delKam; bledy1(it).temp(ik,oz)=temp; end end end end </pre>	<pre> [xq,yq] = meshgrid(xq1,yq1); [Xq,Yq,vq] = griddata(X,Y,Z,xq,yq,"linear");  % subplot(2,1,1) % mesh(Xq,Yq,vq); % hold on % plot3(X,Y,Z,'); % xlabel('temp, K'); ylabel('stała czas, s'); zlabel('del kam, K/W') % title('zal. grub. kam(K/W) od st. czas.(s) od temp.(K), V=0') % subplot(2,1,2) % contourf(Xq,vq,Yq,30,'ShowText','on',"LabelFormat","%0.2f") % xlabel('temp, K'); ylabel('stała czas, s'); ylabel('del kam, K/W') % title('zal. grub. kam(K/W) od st. czas.(s) od temp.(K), V=0') end  function delkam1=grubKamieniaOblicz(temp,tabPrzep0) global sPar %obliczenie grubosci kamienia %sPar.otwarcieZaw=-7;%zawor musi byc zamkniety delkam0=2.28;%zakładam grubosc kamienia aby wykonać obliczenia modelu dla 0 przepływu %zalozona grubość bedzie następnie identyfikowana po stałej czasowej % [pomStrumV1, szczPom0]=startModel(temp,delkam0) %pomiar (tu obliczenia) stałej czasowej  %Identyfikacja grubości kamienia z katalogu dla 0 l/s przepływu delkam1=netPomKamien(tabPrzep0,szczPom0,temp) %tu już wiadomo jaki gruby jest kamień end %% %  function [wynik, stCzas]=startModel(tempIni,delKam) global sPar sPar.tempIni=tempIni; sPar.delKamienia=delKam; open(sPar.aaNazwaModelu) %wy=sim(sPar.aaNazwaModelu) wy=symulacja(sPar.aaNazwaModelu); out1=oblicz1(wy,sPar); wynik=median(out1.out.strumienV); stCzas=out1.out.szcz1(1); end  function strum=netPrzepStrum(tab,t,szcz,delkam) %T(:,1)=[tab(:).delKamienia].'; P(1,:)= [tab(:).szcz1].'; P(2,:)= [tab(:).tempIni].'; P(3,:)= [tab(:).delKamienia].';  T(1,:)= [tab(:).strumienV].'; %net=newgrnn(P,T); net=newrbe(P,T); Pn(1,:)=szcz; Pn(2,:)=t; Pn(3,:)=delkam; strum=sim(net,Pn); %view(net) %siatka(tab); end  function delKam=netPomKamien(tab,szcz1,temp) %procedura szuka grubości kamienia w tabeli tab dla podanej stałej czasowej i %temperatury %T(:,1)=[tab(:).delKamienia].'; P(1,:)= [tab(:).szcz1].'; P(2,:)= [tab(:).tempIni].'; T(1,:)= [tab(:).delKamienia].'; net0=newgrnn(P,T,10); Pn(1,:)=szcz1; Pn(2,:)=temp; delKam=sim(net0,Pn); %view(net0) </pre>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<pre>function [bladProcV, bladKamien0, pomStrumPom,temp,delKam00]=cyklPomiar(temp,delKam00,otw Zaworu,tabPrzep, tabPrzep0) global sPar %delKam00=0.2;%pomiar dla zerowego przepływu  [pomStrumObl00, zmierzonaStCzas0]=stPomiarStalejCzasPrzeplyw(- 9,temp,delKam00);% -7 oznacza przepływ 0  delKam0=wyznaczGrubKam(tabPrzep0,temp,zmierzonaStCzas0); bladKamien0=abs(delKam00-delKam0)/delKam00*100;  %otwZaworu=otwZaw % [-7... 0.6] [pomStrumObl, szczPom]=stPomiarStalejCzasPrzeplyw(otwZaworu,temp,delKam0 ); pomStrumPom=pomiarStrum(tabPrzep,temp,szczPom,delKam0);  %tu znamy druga stałą czasową, grubość kamienia i temperaturę czynnika bladProcV = abs((pomStrumObl- pomStrumPom)/pomStrumObl)*100; end  function [pomStrumObl, szczPom]=stPomiarStalejCzasPrzeplyw(otwZaw,temp,delKam0) global sPar %tu mierzymy stałą na stanowisku laboratoryjnym sPar.otwarcieZaw=otwZaw; [pomStrumObl, szczPom]=startModel(temp,delKam0); end  function strumV=pomiarStrum(tabPrzep,temp,szczPom,delkam0) global glRysuj %[xq,yq,zq,V]=siatka1(tabPrzep,temp,szczPom,delkam0); %[xq,yq,vq,Re,Pr]=siatka2(tabPrzep,temp,szczPom,delkam0); par=siatka2(tabPrzep,temp,szczPom,delkam0); %strumV = interp3(xq,yq,zq,V,temp,szczPom,delkam0); strumV1 = interp2(par.Xq,par.Yq,par.Vq,delkam0,szczPom); strumV=par.strumV;  if glRysuj==1 figure(80)  subplot(2,1,1) mesh(par.Xq,par.Yq,par.Vq); hold on plot3(par.X,par.Y,par.V,'); plot3(par.X,par.Y,par.VRe,'); subplot(2,1,1); hold on scatter3(delkam0,szczPom,strumV,'o','filled',LineWidth=3)  xlabel('del.kam'); ylabel('stala czas, s'); zlabel('strum') xlim([0,3]);ylim([0,5]);zlim([0.005,0.3]); title('zal. strum od st. czas.(s) i temp')  subplot(2,1,2)  contourf(par.Xq,par.Vq,par.Yq,40,'ShowText','on','LabelFormat", "%0.2f") hold on plot(delkam0,strumV,'o',LineWidth=3,Color=[1 0 0]) xlim([0,3]);zlim([0,5]);ylim([0.005,0.3]); xlabel('del kam'); zlabel('st.czas'); ylabel('strum') title('zal. strum od st. czas.(s) i temp')  figure(90) subplot(2,1,1); mesh(par.Xq,par.Yq,par.Req); hold on pRe=interp2(par.Xq,par.Yq,par.Req,delkam0,szczPom); plot3(delkam0,szczPom,pRe,'o',LineWidth=3,Color=[1 0 0])  xlabel('del.kam'); ylabel('stala czas, s'); zlabel('Re') title('liczba Reynoldsa')</pre>	<pre>siatka0(tab) end  function siatka(tab) x1(:)=[tab(:).tempIni]; x2(:)=[tab(:).delKamienia]; x3(:)=[tab(:).scz1]; Z(:)=[tab(:).strumienV];  [X1,X2,X3] = ndgrid(x1,x2,x3); ZZ=interp(X1,X2,X3,Z);  xq1=[280:0.2:360]; yq1=[2:0.02:4.5]; [xq,yq] = meshgrid(xq1,yq1); [Xq,Yq,vq] = griddata(X,Y,Z,xq,yq); mesh(Xq,Yq,vq); hold on plot3(X,Y,Z,'); xlabel('temp, K'); ylabel('stala czas, s'); zlabel('del kam, K/W') end  function [strum, bl]=mStrumien(stCzasPom, temp,cisn) global mKamPrzyrzad mKamPrzyrzad0 %temp=360; cisn=4; stCzas0=3.5; %stala czasowa z pomiaru dla zerowego przepływu [delKam, bl]=mPomiarDelKam(stCzas0,temp,cisn); %stCzasPom=4; [strum, bl]=mPomiarStrum(stCzasPom,delKam,temp,cisn); end  function [strumV, blad]=mPomiarStrum(stCzas1,delKam,temp,cisn) global mKamPrzyrzad liczMax=size(mKamPrzyrzad,2); licz=1; blad=0; strumV=0; while ((mKamPrzyrzad(1,licz).tempIni&lt;temp)    (mKamPrzyrzad(1,licz).cisnSieci&lt;cisn) &amp;&amp; (licz&lt;liczMax) licz=licz+1; end  while (stCzas1&lt;mKamPrzyrzad(1,licz).scz1) &amp;&amp; (delKam&gt;mKamPrzyrzad(1,licz).delKamienia) &amp;&amp; (licz&lt;liczMax) licz=licz+1; end  if licz&gt;=liczMax strumV=0;blad=1; else strumV=mKamPrzyrzad(1,licz).strumienV; end  end %% %  function [delKam, blad]=mPomiarDelKam(stalaCzas0,temp,cisn) global mKamPrzyrzad0 %szukanie stałej czasowej dla przepływu zerowego aby odczytać grubość %%kamienia  liczMax=size(mKamPrzyrzad0,2); licz=1; blad=0; while ((mKamPrzyrzad0(1,licz).tempIni&lt;temp)    (mKamPrzyrzad0(1,licz).cisnSieci&lt;cisn) &amp;&amp; (licz&lt;liczMax) licz=licz+1; end while (stalaCzas0&gt;mKamPrzyrzad0(1,licz).scz1) &amp;&amp; (licz&lt;liczMax) licz=licz+1; end if licz&gt;=liczMax delKam=0;blad=1; else</pre>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<pre> subplot(2,1,2); mesh(par.Xq,par.Yq,par.Prq); hold on pPr=interp2(par.Xq,par.Yq,par.Prq,delkam0,szczPom); plot3(delkam0,szczPom,pPr,'o',LineWidth=3,Color=[1 0 0])  %plot(delkam0,stromV,'o',LineWidth=3,Color=[1 0 0])  xlabel('del.kam'); ylabel('stala czas, s'); zlabel('Pr') title('liczba Prandla') end end  function [par]=siatka2(tabZ,temp,szczPom,delkam0) tab1=kopiuJDaneZZakresu(tabZ,temp,szczPom,delkam0); % X(:)=[tab1(:).tempIni].'; X(:)=[tab1(:).delKamienia].'; Y(:)=[tab1(:).szcz1].'; V(:)=[tab1(:).stromienV].'; Re(:)=[tab1(:).Re].'; Pr(:)=[tab1(:).Pr].';  xq1=min(X): 0.01: max(X); yq1=min(Y): 0.01: max(Y); [xq,yq] = meshgrid(xq1,yq1); [Xq,Yq,Vq] = griddata(X,Y,V,xq,yq,"linear");  %stromV = interp2(Xq,Yq,Vq,delkam0,szczPom); stromV=interpStrumien(X,Y,V,delkam0,szczPom)  [Xq,Yq,Req] = griddata(X,Y,Re,xq,yq,"linear"); [Xq,Yq,Prq] = griddata(X,Y,Pr,xq,yq,"linear");  %oznaczenie granicy przepływu burzliwego for ii=1:1:size(Re,2)     VRe(ii)=V(ii);     if (Re(ii)&lt;2300)    (Re(ii)&gt;3000)         VRe(ii)=NaN;     end end  %stromV = interp2(xq,yq,vq,delkam0,szczPom);  par.Xq=Xq; par.Yq=Yq; par.Vq=Vq; par.Req=Req; par.VRe=VRe; par.Prq=Prq; par.X=X; par.Y=Y; par.V=V; par.stromV=stromV;  % subplot(2,1,1) % mesh(Xq,Yq,Vq); % hold on % plot3(X,Y,V,'.'); % plot3(X,Y,VRe,'+'); % % xlabel('del.kam'); ylabel('stala czas, s'); zlabel('strom') % xlim([0,3]);ylim([0,5]);zlim([0.005,0.3]); % title('zal. strum od st. czas. (s) i temp') % % subplot(2,1,2) % contourf(Xq,Vq,Yq,40,'ShowText','on','LabelFormat','%0.2f') % xlim([0,3]);zlim([0,5]);ylim([0.005,0.3]); % xlabel('del kam'); zlabel('st.czas'); ylabel('strom') % title('zal. strum od st. czas. (s) i temp')  %stromV = interp2(Xq,Yq,Vq,szczPom,delkam0);  end  function stromV=interpStrumien(X,Y,V,delkam0,szczPom) %interpolacja strumienia z zwiększoną dokładnością </pre>	<pre> delKam=mKamPrzyrzad0(1,licz).delKamienia; end end  %%%%%%%%%%%%%% function wOut=oblicz1(out,sPar) wyn=zmianaRes(out.zKamieniemT); %wyn=out.zKamieniemT; wyn1=wytnij(wyn, sPar.czasZmianaTempWody+0.1,sPar.czasNagrzStart-0.1); szcz1=stalaCzas(wyn1); wyn2=wytnij(wyn,sPar.czasNagrzStart+sPar.czasNagrzDlugosc- 1,80); szcz2=stalaCzas2(wyn2); wOut.out=out; wOut.out.wyn1=wyn1; wOut.out.wyn2=wyn2; wOut.out.szcz1=szcz1; wOut.out.szcz2=szcz2; %wOut.out.szcz1k=szcz1k; %wOut.out.szcz2k=szcz2k; wOut.out.sPar=sPar; wOut.otwZaworu=sPar.otwarcieZaw; end  function wy1=symulacja(cModel) global sPar ob_out wy=sim(cModel); ob_out=wy; wy1.bezKamieniaT=wy.bezKamieniaT; %wy1.logsout="";%wy.logsout; wy1.strumienM=wy.strumienM; wy1.strumienV=wy.strumienV; %wy1.tout="";%wy.tout; wy1.zKamieniemT=wy.zKamieniemT; wy1.Reynolds=wy.Reynolds; wy1.predkPrzeplyw=wy.predkPrzeplyw; %wy1.SimulationMetadata="";%wy.SimulationMetadata; %wy1.ErrorMessage=wy.ErrorMessage; %disp(sPar) end  function szcz2=stalaCzas2(seria) seria=odwrocWykres(seria); szcz2=stalaCzas(seria); end  function wynS=odwrocWykres(seria) dl=length(seria.data); sredP=mean(seria.data(1:50)); sredK=mean(seria.data(dl-50:dl)); ds=seria.data; for ii=1:1:dl     ds(ii)=sredK-(ds(ii)-sredK); end seria.data=ds; wynS=seria; end  function sbSer=wytnij(seria,czP,czK) licz1=1; while seria.Time(licz1)&lt;czP     licz1=licz1+1; %indeks początku podzbioru do analizy end licz2=licz1; while seria.Time(licz2)&lt;czK     licz2=licz2+1; %indeks końca podzbioru do analizy end sbSer=getsamples(seria,licz1:1:licz2); end  function wynik=stalaCzas(sbSer) idPocz=szukajPocz(sbSer); idKon=szukajKon(sbSer); </pre>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<pre> xq1=min(X): 0.001: max(X); yq1=min(Y): 0.001: max(Y); [xq,yq] = meshgrid(xq1,yq1); [Xq,Yq,Vq] = griddata(X,Y,V,xq,yq,"linear"); strumV = interp2(Xq,Yq,Vq,delkam0,szczPom); end  function [xq,yq,zq,V1]=siatka1(tabZ,temp,szczPom,delkam0) tab1=kopiuJDaneZZakresu(tabZ,temp,szczPom,delkam0); X(:)=[tab1(:).tempIni].'; Y(:)=[tab1(:).szcz1].'; Z(:)=[tab1(:).delKamienia].'; V(:)=[tab1(:).strumienV].';  xq1=min(X): 0.25: max(X); yq1=min(Y): 0.1: max(Y); zq1=min(Z): 0.2: max(Z); [xq,yq,zq] = meshgrid(xq1,yq1,zq1); V1 = griddata(X,Y,Z,V,xq,yq,zq); figure(70) wyn=slice(xq1,yq1,zq1,V1,temp,szczPom,delkam0); xlabel('temp');ylabel('st.czas');zlabel('del.kam') %shading interp figure(71) ss=size(X,2); xs=1:1:ss;  subplot(4,1,1);plot(xs,X,xs,ones(1,ss)*temp);ylabel('temp');title('d ane surowe do interpolacji') subplot(4,1,2);plot(xs,Y,xs,ones(1,ss)*szczPom);ylabel('stczas'); subplot(4,1,3);plot(xs,Z,xs,ones(1,ss)*delkam0);ylabel('kamien'); subplot(4,1,4);plot(V);ylabel('strum');  % s = isosurface(xq1,yq1,zq1,V1,temp); wynC=contourslice(xq1,yq1,zq1,V1,[],[],[]); %contourslice(X,Y,Z,V,xslice,yslice,zslice)  % V1 = griddata(X,Y,Z,V,temp,szczPom,delkam0) V2 = interp3(xq1,yq1,zq1,V1,temp,szczPom,delkam0) %slice(V1,300,3,2) % przeplyw = interp3(X,Y,Z,temp0,stCzas0);  % subplot(2,1,1) % mesh(Xq,Yq,vq); % hold on % plot3(X,Y,Z,'.'); % xlabel('temp, K'); ylabel('stala czas, s'); zlabel('del kam, K/W') % title('zal. grub. kam(K/W) od st. czas.(s) od temp.(K), V=0') % subplot(2,1,2) % contourf(Xq,vq,Yq,30,'ShowText','on',"LabelFormat","%0.2f") % xlabel('temp, K'); zlabel('stala czas, s'); ylabel('del kam, K/W') % title('zal. grub. kam(K/W) od st. czas.(s) od temp.(K), V=0') % netPrzepStrum(tab1,temp,szczPom,delkam0) end  function kopia=kopiuJDaneZZakresu(tabZ,temp,szczPom,delkam0) iiMax=size(tabZ,2);licz=1;delZakr=5; while (licz&lt;=iiMax) &amp;&amp; (tabZ(licz).tempIni&lt;=temp-delZakr);     licz=licz+1; end poczZakrT=licz; while (licz&lt;=iiMax) &amp;&amp; (tabZ(licz).tempIni&lt;=temp+delZakr);     licz=licz+1; end konZakrT=licz; %tt=tabZ(licz).tempIni; %poczZakrT=1;konZakrT=480; %linia ogranicza tabele do temp 280K kopia=tabZ(poczZakrT:1:konZakrT-1); %kopia=grupujDane(kopia); end  function kamien_K_W=wyznaczGrubKam(tab0,temp0,stCzas0) </pre>	<pre> sbStCzas=getsamples(sbSer,idPocz:1:idKon); dlug=length(sbStCzas.data)-5; wskazPocz=mean(sbStCzas.data(1:5)); wskazKonc=mean(sbStCzas.data(dlug:dlug+5)); pozStCzas=wskazPocz+0.632*(wskazKonc-wskazPocz); %pozStCzas=wskazPocz+0.75*(wskazKonc-wskazPocz); licz=1; while sbStCzas.data(licz)&lt;pozStCzas     licz=licz+1; end wynik(1)=sbStCzas.Time(licz)-sbStCzas.Time(1);  %sbStCzas1=getsamples(sbStCzas,licz:1:size(sbStCzas.data,1));  wynik(2)=stalaCzas2rodz(sbStCzas); wynik(3)=0; end  function wyn=stalaCzas2rodz(sbStCzas) %liczy czas do największego przyrostu % licz=1; % dtp=(sbStCzas.time(11)-sbStCzas.time(1))/10; % for ii=10:1:(size(sbStCzas.data,1)-10) %     licz=licz+1; %     dt(licz)=licz*dtp; %     dy(licz)=(sbStCzas.data(ii+2)+sbStCzas.data(ii+4))- (sbStCzas.data(ii-2)+sbStCzas.data(ii-4))/2; %     wdy(licz)=dy(licz-1)-dy(licz); % end % [max1,poz1]=max(wdy); % wyn=sbStCzas.time(poz1)-sbStCzas.time(1); % figure(50) % hold on % plot(wdy) wyn=0; end  function poz=szukajKon(seria) poz=length(seria.data)-100;%tu można wpisać procedure poszukiwania end  function poz=szukajPocz(seria) koniec=length(seria.data)-100; licz=0; testAVG=mean(seria.data(1:50)); testAVG1=testAVG; while (licz&lt;koniec) &amp;&amp; (abs(testAVG- testAVG1)/testAVG*100&lt;0.02)     testAVG1=mean(seria.data(1+licz:50+licz));     licz=licz+1; end poz=licz; end  function wyn=zmianaRes(dataTS) xmin=min(dataTS.Time); xmax=max(dataTS.Time); delx=0.001; %s, rozdzielczość w sekundach wyn=resample(dataTS,xmin:delx:xmax); end  function zerujZmiennaOut(wyn) %wyn(1).wp(1).wynT(1).wOut(8).out.SimulationMetadata for ii=1:1:size(wyn,2) end end </pre>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

```
global glRysuj
[Xq,Yq,Vq,X,Y,Z]=siatka0(tab0);
kamien_K_W = interp2(Xq,Yq,Vq,temp0,stCzas0);

if glRysuj==1
figure(60)
subplot(2,1,1);hold on
mesh(Xq,Yq,Vq);
hold on
plot3(X,Y,Z,'');
xlabel('temp, K'); ylabel('stala czas, s'); zlabel('del kam, K/W')
title('zal. grub. kam(K/W) od st. czas.(s) od temp.(K), V=0')
scatter3(temp0,stCzas0,kamien_K_W,'o','filled',LineWidth=3)

subplot(2,1,2);hold on
%scatter3(temp0,stCzas0,kamien_K_W,'o','filled')
contourf(Xq,Vq,Yq,30,'ShowText','on','LabelFormat','%0.2F')
plot(temp0,kamien_K_W,'o',LineWidth=3,Color=[1 0 0])

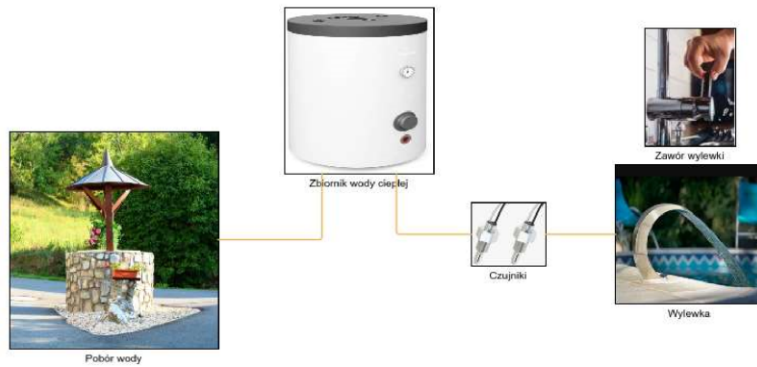
xlabel('temp, K'); ylabel('stala czas, s'); zlabel('del kam, K/W')
title('zal. grub. kam(K/W) od st. czas.(s) od temp.(K), V=0')
end
end
```



## Załącznik 3

Raport modelu MatLab-Simscape:

### sysCharakterystyki05



#### obliczenia

19-Feb-2024 20:28:00

#### Spis treści

[Model - sysCharakterystyki05](#)

[Machine - sysCharakterystyki05](#)

[System - sysCharakterystyki05](#)

[System - sysCharakterystyki05/Czujniki](#)

[System - sysCharakterystyki05/Czujniki/Reynolds](#)

[System - sysCharakterystyki05/Czujniki/Wymuszenie\\_nagrzewanie\\_czujnika](#)

[System - sysCharakterystyki05/Pobór wody](#)

[System - sysCharakterystyki05/Wylewka](#)

[System - sysCharakterystyki05/Wylewka/Subsystem](#)

[System - sysCharakterystyki05/Zawór wylewki](#)

[System - sysCharakterystyki05/Zbiornik wody ciepłej](#)

[Appendix](#)

#### Spis tabel

- [1. From Block Properties](#)
- [2. Goto Block Properties](#)
- [3. PMIOPort Block Properties](#)
- [4. PS-Simulink Converter Block Properties](#)
- [5. Perfect Insulator Block Properties](#)
- [6. Pipe \(TL\) Block Properties](#)
- [7. Temperature Sensor Block Properties](#)
- [8. Thermal Mass Block Properties](#)
- [9. Thermal Reference Block Properties](#)
- [10. Thermal Resistance Block Properties](#)
- [11. ToWorkspace Block Properties](#)
- [12. Absolute Reference \(TL\) Block Properties](#)
- [13. Gain Block Properties](#)
- [14. Mass & Energy Flow Rate Sensor \(TL\) Block Properties](#)
- [15. PMIOPort Block Properties](#)
- [16. PS-Simulink Converter Block Properties](#)
- [17. Pressure & Temperature Sensor \(TL\) Block Properties](#)
- [18. Product Block Properties](#)
- [19. Thermodynamic Properties Sensor \(TL\) Block Properties](#)
- [20. ToWorkspace Block Properties](#)
- [21. Volumetric Flow Rate Sensor \(TL\) Block Properties](#)
- [22. Constant Block Properties](#)
- [23. Controlled Temperature Source Block Properties](#)
- [24. PMIOPort Block Properties](#)
- [25. Simulink-PS Converter Block Properties](#)
- [26. Step Block Properties](#)
- [27. Sum Block Properties](#)
- [28. Thermal Reference Block Properties](#)
- [29. Thermal Resistance Block Properties](#)
- [30. Variable Thermal Resistance Block Properties](#)
- [31. Absolute Reference \(TL\) Block Properties](#)
- [32. Flow Resistance \(TL\) Block Properties](#)
- [33. Goto Block Properties](#)
- [34. PMIOPort Block Properties](#)
- [35. PS-Simulink Converter Block Properties](#)
- [36. Pressure & Temperature Sensor \(TL\) Block Properties](#)
- [37. Reservoir \(TL\) Block Properties](#)
- [38. Solver Configuration Block Properties](#)

39. [Thermal Liquid Settings \(TL\) Block Properties](#)
40. [Volumetric Flow Rate Sensor \(TL\) Block Properties](#)
41. [Absolute Reference \(TL\) Block Properties](#)
42. [Constant Block Properties](#)
43. [Flow Resistance \(TL\) Block Properties](#)
44. [From Block Properties](#)
45. [Gain Block Properties](#)
46. [Mass & Energy Flow Rate Sensor \(TL\) Block Properties](#)
47. [PMIOPort Block Properties](#)
48. [PS-Simulink Converter Block Properties](#)
49. [Poppet Valve \(TL\) Block Properties](#)
50. [Pressure & Temperature Sensor \(TL\) Block Properties](#)
51. [Reservoir \(TL\) Block Properties](#)
52. [Simulink-PS Converter Block Properties](#)
53. [Sum Block Properties](#)
54. [ToWorkspace Block Properties](#)
55. [Volumetric Flow Rate Sensor \(TL\) Block Properties](#)
56. [PMIOPort Block Properties](#)
57. [Poppet Valve \(TL\) Block Properties](#)
58. [Constant Block Properties](#)
59. [Goto Block Properties](#)
60. [Sin Block Properties](#)
61. [Step Block Properties](#)
62. [Sum Block Properties](#)
63. [Absolute Reference \(TL\) Block Properties](#)
64. [Constant Block Properties](#)
65. [Controlled Temperature Source Block Properties](#)
66. [PMIOPort Block Properties](#)
67. [PS-Simulink Converter Block Properties](#)
68. [Pipe \(TL\) Block Properties](#)
69. [Pressure & Temperature Sensor \(TL\) Block Properties](#)
70. [Simulink-PS Converter Block Properties](#)
71. [Sin Block Properties](#)
72. [Step Block Properties](#)
73. [Sum Block Properties](#)
74. [Thermal Reference Block Properties](#)
75. [Thermal Resistance Block Properties](#)
76. [Block Type Count](#)
77. [Model Variables](#)
78. [Model Functions](#)

## Model - sysCharakterystyki05

### Spis treści

[Machine - sysCharakterystyki05](#)

#### Full Model Hierarchy

1. [sysCharakterystyki05](#)
  1. [Czujniki](#)
    1. [Reynolds](#)
    2. [Wymuszenie, nagrzewanie czujnika](#)
  2. [Pobór wody](#)
  3. [Wylewka](#)
    1. [Subsystem](#)
  4. [Zawór wylewki](#)
  5. [Zbiornik wody ciepłej](#)

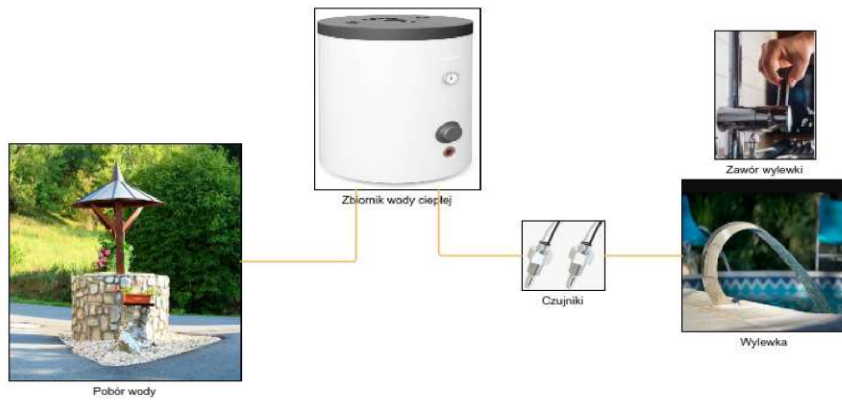
Simulation Parameter	Value
Solver	VariableStepAuto
RelTol	1e-4
Refine	1
MaxOrder	5
ZeroCross	on

[\[more info\]](#).

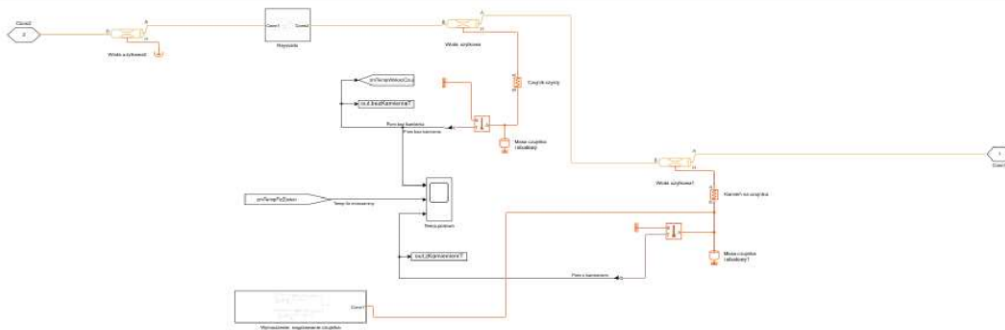
## Machine - sysCharakterystyki05

[\[more info\]](#).

## System - sysCharakterystyki05



**System - [sysCharakterystyki05/Czujniki](#)**



**Tabela 1. From Block Properties**

Name	Goto Tag	Icon Display	Goto Blk Name	Goto Blk Location	Defined In Blk
Temp zadana	zmTempFizZawor	Tag	<a href="#">midpoint pressure perturbation</a>	<a href="#">sysCharakterystyki05/Pobór wody</a>	Ground

**Tabela 2. Goto Block Properties**

Name	Goto Tag	Icon Display	Tag Visibility	From Blk	From Blk Location	Used By Blk
midpoint pressure perturbation2	zmTempWskazCzuj	Tag	global	<a href="#">Temp wskaz czuj</a>	<a href="#">sysCharakterystyki05/Wylewka</a>	Scope1, <a href="#">To Workspace1</a> , Temp.porown

**Tabela 3. PMIOPort Block Properties**

Name	Port	Side	Connection Type
Conn1	1	Left	Inherit: auto
Conn2	2	Right	Inherit: auto

**Tabela 4. PS-Simulink Converter Block Properties**

Name	Physical Domain	Sub Class Name	Left Port Type	Right Port Type	Pseudo Periodic	Vector Format	Unit	Affine Conversion
PS-Simulink Converter1	network_engine_domain	ps_output	input	output	off	1-D array	inherit	off
PS-Simulink Converter2	network_engine_domain	ps_output	input	output	off	1-D array	inherit	off

**Tabela 5. Perfect Insulator Block Properties**

Name	T specify	T nominal specify
Perfect Insulator	off	off

**Tabela 6. Pipe (TL) Block Properties**

Name	Length	Length unit	Length conf	Area	Area unit	Area conf	Dh	Dh unit	Dh conf	Length add	Length add unit	Length add conf	Roughness	Rough unit
Woda użytkowa	sPar.czujDlugosc*20	cm	runtime	fnDelPrzekroj(0)	cm^2	runtime	sPar.czujSredn	cm	runtime	0	m	compiletime	1e-5	m

*Konstrukcja, badania i optymalizacja systemu pomiaru strumienia pracującego w warunkach długookresowego użytkowania w środowisku wody twardej*

Name	Length	Length unit	Length conf	Area	Area unit	Area conf	Dh	Dh unit	Dh conf	Length add	Length add unit	Length add conf	Roughness	Rough unit
Woda uzytkowa1	sPar.czujDlugosc*20	cm	runtime	fnDelPrzekroj(1)	cm^2	runtime	sPar.czujSrednZKam	cm	runtime	0	m	compiletime	1e-5	m
Woda uzytkowa2	100	cm	runtime	fnDelPrzekroj(0)	cm^2	runtime	sPar.czujSredn	cm	runtime	0	m	compiletime	1e-5	m

**Tabela 7. Temperature Sensor Block Properties**

Name
Temperature Sensor
Temperature Sensor1

**Tabela 8. Thermal Mass Block Properties**

Name	Mass	Mass unit	Mass conf	Sp heat	Sp heat unit	Sp heat conf	Num ports	Num ports unit	Num ports conf	T specify	T priority	T	T unit	T nominal specify
Masa czujnika i obudowy	sPar.masaCzujnika	g	runtime	450	J/kg/K	compiletime	foundation.enum.numPorts2.one	1	compiletime	on	High	sPar.tempIni	K	off
Masa czujnika i obudowy1	sPar.masaCzujnika	g	runtime	450	J/kg/K	compiletime	foundation.enum.numPorts2.one	1	compiletime	on	High	sPar.tempIni	K	off

**Tabela 9. Thermal Reference Block Properties**

Name
Thermal Reference2
Thermal Reference3

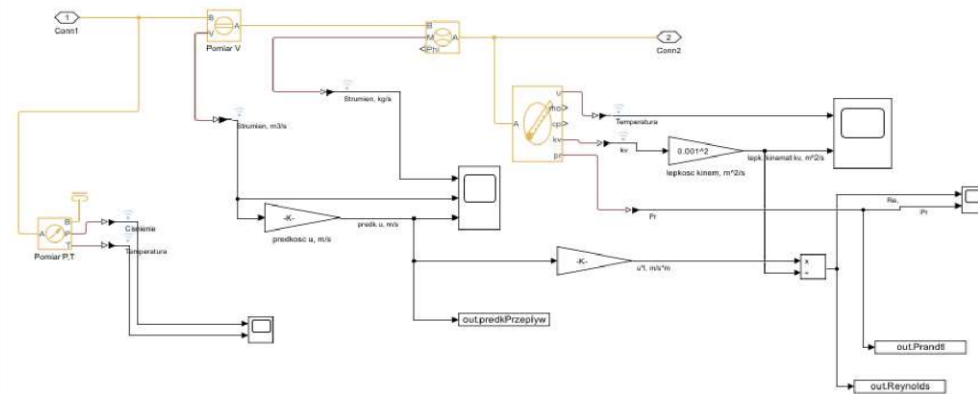
**Tabela 10. Thermal Resistance Block Properties**

Name	Resistance	Resistance unit	Resistance conf	T specify	T nominal specify	Q specify	Q nominal specify
Czujnik czysty	sPar.rezCzujnikCzysty	K/W	runtime	off	off	off	off
Kamień na czujniku	sPar.rezCzujnikCzysty+sPar.delKamienia	K/W	runtime	off	off	off	off

**Tabela 11. ToWorkspace Block Properties**

Name	Variable Name	Max Data Points	Decimation	Save Format	Save 2DSignal	Fixpt As Fi
To Workspace	zKamieniemT	inf	1	Timeseries	3-D array (concatenate along third dimension)	off
To Workspace 1	bezKamieniaT	inf	1	Timeseries	3-D array (concatenate along third dimension)	off

**System - [sysCharakterystyki05/Czujniki/Reynolds](#)**



**Tabela 12. Absolute Reference (TL) Block Properties**

Name
Absolute Reference (TL)

**Tabela 13. Gain Block Properties**

Name	Gain	Multiplication	Param Data Type Str	Out Data Type Str	Lock Scale	Rnd Meth	Saturate On Integer Overflow

Name	Gain	Multiplication	Param Data Type Str	Out Data Type Str	Lock Scale	Rnd Meth	Saturate On Integer Overflow
	sPar.czujSrednZKam*0.01	Element-wise(K.*u)	Inherit: Inherit via internal rule	Inherit: Inherit via internal rule	off	Floor	off
lepkość kinem, m <sup>2</sup> /s	0.001 <sup>2</sup>	Element-wise(K.*u)	Inherit: Inherit via internal rule	Inherit: Inherit via internal rule	off	Floor	off
prędkość u, m/s	1/(fnDelPrzekroj(1)*0.01 <sup>2</sup> )	Element-wise(K.*u)	Inherit: Inherit via internal rule	Inherit: Inherit via internal rule	off	Floor	off

**Tabela 14. Mass & Energy Flow Rate Sensor (TL) Block Properties**

Name
Mass & Energy Flow Rate Sensor (TL)

**Tabela 15. PMIOPort Block Properties**

Name	Port	Side	Connection Type
Conn1	1	Left	Inherit: auto
Conn2	2	Right	Inherit: auto

**Tabela 16. PS-Simulink Converter Block Properties**

Name	Physical Domain	Sub Class Name	Left Port Type	Right Port Type	Pseudo Periodic	Vector Format	Unit	Affine Conversion
PS-Simulink Converter1	network_engine_domain	ps_output	input	output	off	1-D array	1	off
PS-Simulink Converter2	network_engine_domain	ps_output	input	output	off	1-D array	K	off
PS-Simulink Converter3	network_engine_domain	ps_output	input	output	off	inherit	inherit	off
PS-Simulink Converter4	network_engine_domain	ps_output	input	output	off	inherit	inherit	off
PS-Simulink Converter5	network_engine_domain	ps_output	input	output	off	1-D array	inherit	off
PS-Simulink Converter6	network_engine_domain	ps_output	input	output	off	1-D array	inherit	off
PS-Simulink Converter7	network_engine_domain	ps_output	input	output	off	1-D array	inherit	off

**Tabela 17. Pressure & Temperature Sensor (TL) Block Properties**

Name
Pomiar P,T

**Tabela 18. Product Block Properties**

Name	Inputs	Multiplication	Collapse Mode	Collapse Dim	Input Same DT	Out Data Type Str	Lock Scale	Rnd Meth	Saturate On Integer Overflow
Divide	*/	Element-wise(*.)	All dimensions	1	off	Inherit: Inherit via internal rule	off	Floor	off

**Tabela 19. Thermodynamic Properties Sensor (TL) Block Properties**

Name
Thermodynamic Properties Sensor (TL)

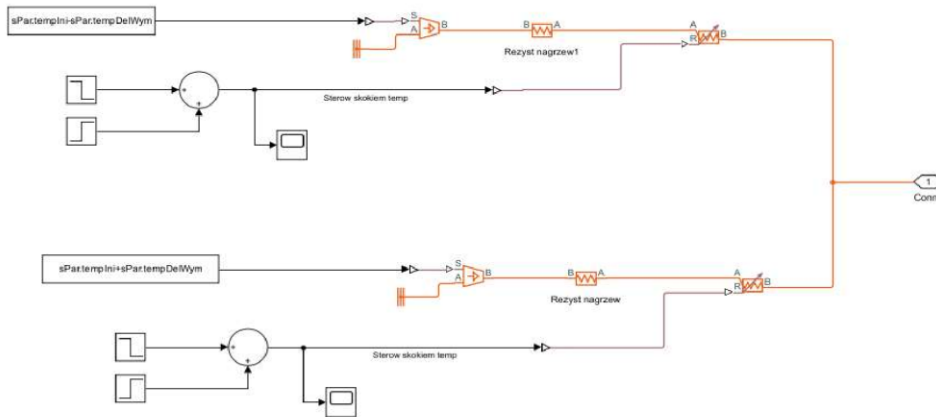
**Tabela 20. ToWorkspace Block Properties**

Name	Variable Name	Max Data Points	Decimation	Save Format	Save 2DSignal	Fixpt As Fi
To Workspace1	Reynolds	inf	1	Timeseries	3-D array (concatenate along third dimension)	off
To Workspace2	predkPrzeplyw	inf	1	Timeseries	3-D array (concatenate along third dimension)	off
To Workspace3	Prandtl	inf	1	Timeseries	3-D array (concatenate along third dimension)	off

**Tabela 21. Volumetric Flow Rate Sensor (TL) Block Properties**

Name
Pomiar V

System - [sysCharakterystyki05/Czujniki/Wymuszenie, nagrzewanie czujnika](#)



**Tabela 22. Constant Block Properties**

Name	Value	Out Data Type Str	Lock Scale	Sample Time	Frame Period
Constant	sPar.tempIni+sPar.tempDelWym	Inherit: Inherit from 'Constant value'	off	inf	inf
Constant1	sPar.tempIni-sPar.tempDelWym	Inherit: Inherit from 'Constant value'	off	inf	inf

**Tabela 23. Controlled Temperature Source Block Properties**

Name
Controlled Temperature Source1
Controlled Temperature Source2

**Tabela 24. PMIOPort Block Properties**

Name	Port	Side	Connection Type
Conn1	1	Right	Inherit: auto

**Tabela 25. Simulink-PS Converter Block Properties**

Name	Physical Domain	Sub Class Name	Left Port Type	Right Port Type	Pseudo Periodic	Noise Distribution	Unit	Affine Conversion	Filtering And Derivatives	Simscape Filter Order	Input Filter Time Constant	Udot User Provided
Simulink-PS Converter1	network_engine_domain	ps_input	input	output	off	none	1	off	zero	1	.001	0
Simulink-PS Converter2	network_engine_domain	ps_input	input	output	off	none	1	on	zero	1	.001	0
Simulink-PS Converter3	network_engine_domain	ps_input	input	output	off	none	1	off	zero	1	.001	0
Simulink-PS Converter4	network_engine_domain	ps_input	input	output	off	none	1	on	zero	1	.001	0

**Tabela 26. Step Block Properties**

Name	Time	Before	After	Out Data Type Str	Sample Time	Zero Cross
Step	sPar.czasNagrzStart	sPar.odcNagrzew	0.0001	double	0	on
Step1	sPar.czasNagrzStart+sPar.czasNagrzDlugosc	0.0001	sPar.odcNagrzew	double	0	on
Step2	sPar.czasZmianaTempWody	sPar.odcNagrzew	0.0001	double	0	on
Step3	sPar.czasZmianaTempWody+sPar.czasNagrzDlugosc	0.0001	sPar.odcNagrzew	double	0	on

**Tabela 27. Sum Block Properties**

Name	Icon Shape	Inputs	Collapse Mode	Collapse Dim	Input Same DT	Accum Data Type Str	Out Data Type Str	Lock Scale	Rnd Meth	Saturate On Integer Overflow
Sum	round	+	All dimensions	1	off	Inherit: Inherit via internal rule	Inherit: Inherit via internal rule	off	Floor	off
Sum1	round	+	All dimensions	1	off	Inherit: Inherit via internal rule	Inherit: Inherit via internal rule	off	Floor	off

**Tabela 28. Thermal Reference Block Properties**

Name
Thermal Reference1
Thermal Reference3

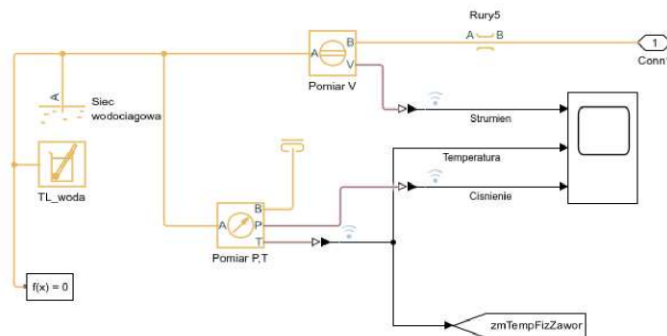
**Tabela 29. Thermal Resistance Block Properties**

Name	Resistance	Resistance unit	Resistance conf	T specify	T nominal specify	Q specify	Q nominal specify
Rezyst nagrzew	0.001	K/W	compiletime	off	off	off	off
Rezyst nagrzew1	0.001	K/W	compiletime	off	off	off	off

**Tabela 30. Variable Thermal Resistance Block Properties**

Name	R min	R min unit	R min conf	T specify	T nominal specify	Q specify	Q nominal specify
Variable Thermal Resistance	0.001	K/W	compiletime	off	off	off	off
Variable Thermal Resistance1	0.001	K/W	compiletime	off	off	off	off

**System - [sysCharakterystyki05/Pobór wody](#)**



**Tabela 31. Absolute Reference (TL) Block Properties**

Name
Absolute Reference (TL)

**Tabela 32. Flow Resistance (TL) Block Properties**

Name	Delta p nominal	Delta p nominal unit	Delta p nominal conf	Mdot nominal	Mdot nominal unit	Mdot nominal conf	Area	Area unit	Area conf	Laminar fraction	Laminar fraction unit	Laminar fraction conf
Rury5	0.001	MPa	compiletime	0.1	kg/s	compiletime	10	cm^2	compiletime	1e-3	1	compiletime

**Tabela 33. Goto Block Properties**

Name	Goto Tag	Icon Display	Tag Visibility	From Blk	From Blk Location	Used By Blk
midpoint pressure perturbation	zmTempFizZawor	Tag	global	<a href="#">Temp zadana</a>	<a href="#">sysCharakterystyki05/Czujniki</a>	Temp.porown, Scope

**Tabela 34. PMIOPort Block Properties**

Name	Port	Side	Connection Type
Conn1	1	Right	Inherit: auto

**Tabela 35. PS-Simulink Converter Block Properties**

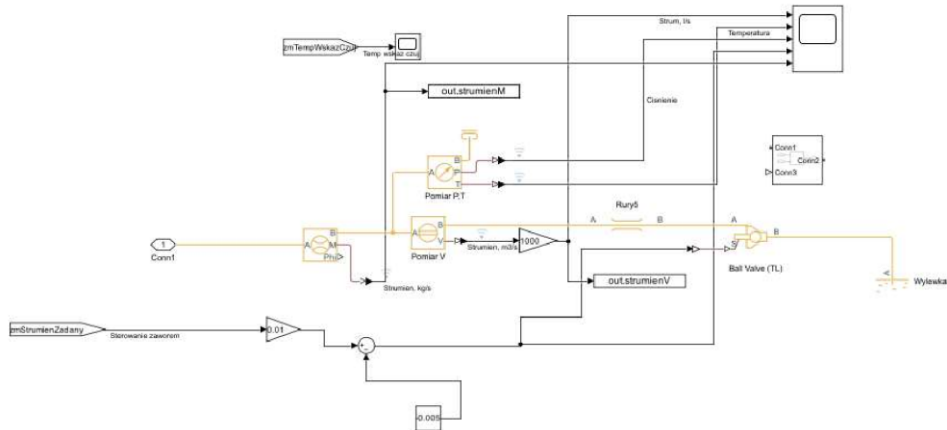
Name	Physical Domain	Sub Class Name	Left Port Type	Right Port Type	Pseudo Periodic	Vector Format	Unit	Affine Conversion
PS-Simulink Converter1	network_engine_domain	ps_output	input	output	off	1-D array	1	off
PS-Simulink Converter2	network_engine_domain	ps_output	input	output	off	1-D array	1	off
PS-Simulink Converter3	network_engine_domain	ps_output	input	output	off	1-D array	1	off

**Tabela 36. Pressure & Temperature Sensor (TL) Block Properties**

Name
Pomiar P,T

**Tabela 37. Reservoir (TL) Block Properties**

Name



**Tabela 41. Absolute Reference (TL) Block Properties**

<b>Name</b>
Absolute Reference (TL)

**Tabela 42. Constant Block Properties**

Name	Value	Out Data Type Str	Lock Scale	Sample Time	Frame Period
Constant	-0.005	Inherit: Inherit from 'Constant value'	off	inf	inf

**Tabela 43. Flow Resistance (TL) Block Properties**

Name	Delta p nominal	Delta p nominal unit	Delta p nominal conf	Mdot nominal	Mdot nominal unit	Mdot nominal conf	Area	Area unit	Area conf	Laminar fraction	Laminar fraction unit	Laminar fraction conf
Rury5	0.001	MPa	compiletime 1	1	kg/s	compiletime 2	2	cm^2	compiletime	1e-3	1	compiletime

**Tabela 44. From Block Properties**

Name	Goto Tag	Icon Display	Goto Blk Name	Goto Blk Location	Defined In Blk
Temp wskaz czuj	zmTempWskazCzuj	Tag	<a href="#">midpoint_pressure_perturbatiom2</a>	<a href="#">sysCharakterystyki05/Czujniki</a>	Ground
Temp zadana	zmStrumienZadany	Tag	<a href="#">midpoint_pressure_perturbatiom2</a>	<a href="#">sysCharakterystyki05/Zawór_wylewki</a>	<a href="#">Sum2</a>

**Tabela 45. Gain Block Properties**

Name	Gain	Multiplication	Param Data Type Str	Out Data Type Str	Lock Scale	Rnd Meth	Saturate On Integer Overflow
Gain	1000	Element-wise(K.*u)	Inherit: Inherit via internal rule	Inherit: Inherit via internal rule	off	Floor	off
Gain1	0.01	Element-wise(K.*u)	Inherit: Inherit via internal rule	Inherit: Inherit via internal rule	off	Floor	off

**Tabela 46. Mass & Energy Flow Rate Sensor (TL) Block Properties**

<b>Name</b>
Mass & Energy Flow Rate Sensor (TL)

**Tabela 47. PMIOPort Block Properties**

Name	Port	Side	Connection Type
Conn1	1	Left	Inherit: auto

**Tabela 48. PS-Simulink Converter Block Properties**

Name	Physical Domain	Sub Class Name	Left Port Type	Right Port Type	Pseudo Periodic	Vector Format	Unit	Affine Conversion
PS-Simulink Converter1	network_engine_domain	ps_output	input	output	off	1-D array	1	off
PS-Simulink Converter2	network_engine_domain	ps_output	input	output	off	1-D array	K	off
PS-Simulink Converter3	network_engine_domain	ps_output	input	output	off	1-D array	m^3/s	off
PS-Simulink Converter4	network_engine_domain	ps_output	input	output	off	inherit	inherit	off



Tabela 49. Poppet Valve (TL) Block Properties

Name	Valve seat spec	Valve seat spec unit	Valve seat spec conf	Cone angle	Cone angle unit	Cone angle conf	Diam ball	Diam ball unit	Diam ball conf	Diam orifice	Diam orifice unit	Diam orifice conf	S min	S min unit	S min conf	Area leak	Area leak unit	Area leak conf	Sm fac
Ball Valve (TL)	2	1	compiletime	179.95	deg	compiletime	11	mm	compiletime	10	mm	compiletime	0	cm	compiletime	1e-14	cm^2	compiletime	1

Tabela 50. Pressure & Temperature Sensor (TL) Block Properties

Name
Pomiar P,T

Tabela 51. Reservoir (TL) Block Properties

Name	Pressure spec	Pressure spec unit	Pressure spec conf	Reservoir temperature	Reservoir temperature unit	Reservoir temperature conf	Area	Area unit	Area conf
Wylewka	foundation.enum.pressure_spec.atmospheric	1	compiletime	300	K	compiletime	20	m^2	compiletime

Tabela 52. Simulink-PS Converter Block Properties

Name	Physical Domain	Sub Class Name	Left Port Type	Right Port Type	Pseudo Periodic	Noise Distribution	Unit	Affine Conversion	Filtering And Derivatives	Simscape Filter Order	Input Filter Time Constant	Udot User Provided
Simulink-PS Converter1	network_engine_domain	ps_input	input	output	off	none	1	off	provide	1	0.001	0

Tabela 53. Sum Block Properties

Name	Icon Shape	Inputs	Collapse Mode	Collapse Dim	Input Same DT	Accum Data Type Str	Out Data Type Str	Lock Scale	Rnd Meth	Saturate On Integer Overflow
Sum	round	+-	All dimensions	1	off	Inherit: Inherit via internal rule	Inherit: Inherit via internal rule	off	Floor	off

Tabela 54. ToWorkspace Block Properties

Name	Variable Name	Max Data Points	Decimation	Save Format	Save 2DSignal	Fixpt As Fi
To Workspace	strumienV	inf	1	Timeseries	3-D array (concatenate along third dimension)	off
To Workspace1	strumienM	inf	1	Timeseries	3-D array (concatenate along third dimension)	off

Tabela 55. Volumetric Flow Rate Sensor (TL) Block Properties

Name
Pomiar V

System - [sysCharakterystyki05/Wylewka/Subsystem](#)

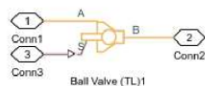


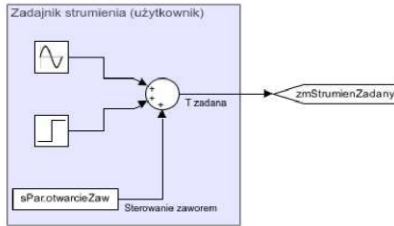
Tabela 56. PMIOPort Block Properties

Name	Port	Side	Connection Type
Conn1	1	Left	Inherit: auto
Conn2	2	Right	Inherit: auto
Conn3	3	Left	Inherit: auto

Tabela 57. Poppet Valve (TL) Block Properties

Name	Valve seat spec	Valve seat spec unit	Valve seat spec conf	Cone angle	Cone angle unit	Cone angle conf	Diam ball	Diam ball unit	Diam ball conf	Diam orifice	Diam orifice unit	Diam orifice conf	S min	S min unit	S min conf	Area leak	Area leak unit	Area leak conf	Sm fac
Ball Valve (TL)1	2	1	compiletime	179.95	deg	compiletime	30	mm	compiletime	20	mm	compiletime	(-0)	cm	compiletime	1e-14	cm^2	compiletime	1

System - [sysCharakterystyki05/Zawór wylewki](#)



**Tabela 58. Constant Block Properties**

Name	Value	Out Data Type Str	Lock Scale	Sample Time	Frame Period
Constant	sPar.otwarcieZaw	Inherit: Inherit from 'Constant value'	off	inf	inf

**Tabela 59. Goto Block Properties**

Name	Goto Tag	Icon Display	Tag Visibility	From Blk	From Blk Location	Used By Blk
midpoint pressure perturbation2	zmStrumienZadany	Tag	global	<a href="#">Temp zadana</a>	<a href="#">sysCharakterystyki05/Wylewka</a>	<a href="#">Gain1</a>

**Tabela 60. Sin Block Properties**

Name	Sine Type	Time Source	Amplitude	Bias	Frequency	Phase	Samples	Offset	Sample Time
Sine Wave1	Time based	Use simulation time	0	0	0.1	0	10	0	0

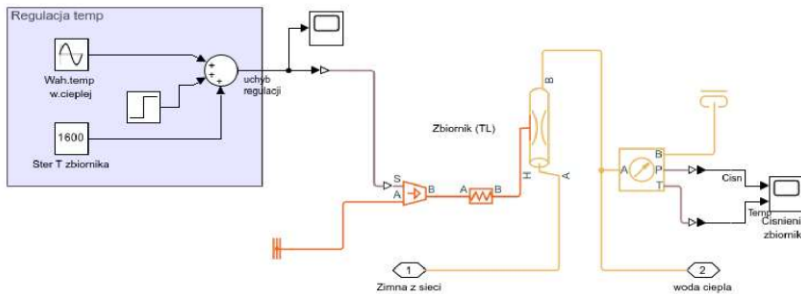
**Tabela 61. Step Block Properties**

Name	Time	Before	After	Out Data Type Str	Sample Time	Zero Cross
Step1	1	0	0	double	0	on

**Tabela 62. Sum Block Properties**

Name	Icon Shape	Inputs	Collapse Mode	Collapse Dim	Input Same DT	Accum Data Type Str	Out Data Type Str	Lock Scale	Rnd Meth	Saturate On Integer Overflow
Sum2	round	+++	All dimensions	1	off	Inherit: Inherit via internal rule	Inherit: Inherit via internal rule	off	Floor	off

**System - [sysCharakterystyki05/Zbiornik wody ciepłej](#)**



**Tabela 63. Absolute Reference (TL) Block Properties**

Name
Absolute Reference (TL)

**Tabela 64. Constant Block Properties**

Name	Value	Out Data Type Str	Lock Scale	Sample Time	Frame Period
Ster T zbiornika	1600	Inherit: Inherit from 'Constant value'	off	inf	inf

**Tabela 65. Controlled Temperature Source Block Properties**

Name
Controlled Temperature Source1

**Tabela 66. PMIOPort Block Properties**

Name

*Konstrukcja, badania i optymalizacja systemu pomiaru strumienia pracującego w warunkach długookresowego użytkownika w środowisku wody twardej*

Name	Port	Side	Connection Type
woda ciepla	2	Right	Inherit: auto
Zimna z sieci	1	Right	Inherit: auto

Tabela 67. PS-Simulink Converter Block Properties

Name	Physical Domain	Sub Class Name	Left Port Type	Right Port Type	Pseudo Periodic	Vector Format	Unit	Affine Conversion
PS-Simulink Converter	network_engine_domain	ps_output	input	output	off	1-D array	MPa	off
PS-Simulink Converter1	network_engine_domain	ps_output	input	output	off	1-D array	1	off

Tabela 68. Pipe (TL) Block Properties

Name	Length	Length unit	Length conf	Area	Area unit	Area conf	Dh	Dh unit	Dh conf	Length add	Length add unit	Length add conf	Roughness	Roughness unit	Roughness conf	Re lam	Re lan uni
Zbiornik (TL)	5	m	compiletime	3	cm^2	compiletime	0.1128	m	compiletime	2	m	compiletime	1.5e-5	m	compiletime	2e+3	1

Tabela 69. Pressure & Temperature Sensor (TL) Block Properties

Name
Pressure & Temperature Sensor (TL)

Tabela 70. Simulink-PS Converter Block Properties

Name	Physical Domain	Sub Class Name	Left Port Type	Right Port Type	Pseudo Periodic	Noise Distribution	Unit	Affine Conversion	Filtering And Derivatives	Simscape Filter Order	Input Filter Time Constant	Udot User Provided
Simulink-PS Converter	network_engine_domain	ps_input	input	output	off	none	K	on	zero	1	.001	0

Tabela 71. Sin Block Properties

Name	Sine Type	Time Source	Amplitude	Bias	Frequency	Phase	Samples	Offset	Sample Time
Wah.temp w.cieplej	Time based	Use simulation time	0	0	1	pi/2	10	0	0

Tabela 72. Step Block Properties

Name	Time	Before	After	Out Data Type Str	Sample Time	Zero Cross
Step1	sPar.czaszZmianaTempWody	0	800	double	0	on

Tabela 73. Sum Block Properties

Name	Icon Shape	Inputs	Collapse Mode	Collapse Dim	Input Same DT	Accum Data Type Str	Out Data Type Str	Lock Scale	Rnd Meth	Saturate On Integer Overflow
Sum2	round	+++	All dimensions	1	off	Inherit: Inherit via internal rule	Inherit: Inherit via internal rule	off	Floor	off

Tabela 74. Thermal Reference Block Properties

Name
Thermal Reference

Tabela 75. Thermal Resistance Block Properties

Name	Resistance	Resistance unit	Resistance conf	T specify	T nominal specify	Q specify	Q nominal specify
Thermal Resistance	1000	K/W	compiletime	off	off	off	off

## Appendix

Tabela 76. Block Type Count

BlockType	Count	Block Names
PS-Simulink Converter (m)	18	<a href="#">PS-Simulink Converter1</a> , <a href="#">PS-Simulink Converter2</a> , <a href="#">PS-Simulink Converter1</a> , <a href="#">PS-Simulink Converter2</a> , <a href="#">PS-Simulink Converter3</a> , <a href="#">PS-Simulink Converter4</a> , <a href="#">PS-Simulink Converter5</a> , <a href="#">PS-Simulink Converter6</a> , <a href="#">PS-Simulink Converter7</a> , <a href="#">PS-Simulink Converter1</a> , <a href="#">PS-Simulink Converter2</a> , <a href="#">PS-Simulink Converter3</a> , <a href="#">PS-Simulink Converter1</a> , <a href="#">PS-Simulink Converter2</a> , <a href="#">PS-Simulink Converter3</a> , <a href="#">PS-Simulink Converter4</a> , <a href="#">PS-Simulink Converter</a> , <a href="#">PS-Simulink Converter1</a>
Scope	12	Scope, Scope1, Scope2, Scope3, Temp.porown, Scope, Scope1, Scope, Scope, Scope1, Cisnienie zbiornika, Scope
PMIOPort	12	<a href="#">Conn1</a> , <a href="#">Conn2</a> , <a href="#">Conn1</a> , <a href="#">Conn2</a> , <a href="#">Conn1</a> , <a href="#">Conn1</a> , <a href="#">Conn1</a> , <a href="#">Conn1</a> , <a href="#">Conn2</a> , <a href="#">Conn3</a> , <a href="#">Zimna z sieci</a> , <a href="#">woda ciepla</a>

*Konstrukcja, badania i optymalizacja systemu pomiaru strumienia pracującego w warunkach długookresowego użytkowania w środowisku wody twardej*

BlockType	Count	Block Names
SubSystem	8	<a href="#">Czujniki</a> , <a href="#">Reynolds</a> , <a href="#">Wymuszenie nagrzewanie czujnika</a> , <a href="#">Pobór wody</a> , <a href="#">Wylewka</a> , <a href="#">Subsystem</a> , <a href="#">Zawór wylewki</a> , <a href="#">Zbiornik wody ciepłej</a>
ToWorkspace	7	<a href="#">To Workspace1</a> , <a href="#">To Workspace2</a> , <a href="#">To Workspace3</a> , <a href="#">To Workspace</a> , <a href="#">To Workspace1</a> , <a href="#">To Workspace</a> , <a href="#">To Workspace1</a>
Step	6	<a href="#">Step</a> , <a href="#">Step1</a> , <a href="#">Step2</a> , <a href="#">Step3</a> , <a href="#">Step1</a> , <a href="#">Step1</a>
Simulink-PS Converter (m)	6	<a href="#">Simulink-PS Converter1</a> , <a href="#">Simulink-PS Converter2</a> , <a href="#">Simulink-PS Converter3</a> , <a href="#">Simulink-PS Converter4</a> , <a href="#">Simulink-PS Converter1</a> , <a href="#">Simulink-PS Converter</a>
Thermal Resistance (m)	5	<a href="#">Czujnik czysty</a> , <a href="#">Kamień na czujniku</a> , <a href="#">Rezyst nagrzew</a> , <a href="#">Rezyst nagrzew1</a> , <a href="#">Thermal Resistance</a>
Thermal Reference (m)	5	<a href="#">Thermal Reference2</a> , <a href="#">Thermal Reference3</a> , <a href="#">Thermal Reference1</a> , <a href="#">Thermal Reference3</a> , <a href="#">Thermal Reference</a>
Sum	5	<a href="#">Sum</a> , <a href="#">Sum1</a> , <a href="#">Sum</a> , <a href="#">Sum2</a> , <a href="#">Sum2</a>
Gain	5	<a href="#">lepkość kinem</a> , <a href="#">m<sup>2</sup>/s</a> , <a href="#">predkosc u</a> , <a href="#">m/s</a> , <a href="#">Gain</a> , <a href="#">Gain1</a>
Constant	5	<a href="#">Constant</a> , <a href="#">Constant1</a> , <a href="#">Constant</a> , <a href="#">Constant</a> , <a href="#">Ster T zbiornika</a>
Pressure & Temperature Sensor (TL) (m)	4	<a href="#">Pomiar P.T</a> , <a href="#">Pomiar P.T</a> , <a href="#">Pomiar P.T</a> , <a href="#">Pressure &amp; Temperature Sensor (TL)</a>
Pipe (TL) (m)	4	<a href="#">Woda uzytkowa</a> , <a href="#">Woda uzytkowa1</a> , <a href="#">Woda uzytkowa2</a> , <a href="#">Zbiornik (TL)</a>
Absolute Reference (TL) (m)	4	<a href="#">Absolute Reference (TL)</a> , <a href="#">Absolute Reference (TL)</a> , <a href="#">Absolute Reference (TL)</a> , <a href="#">Absolute Reference (TL)</a>
Volumetric Flow Rate Sensor (TL) (m)	3	<a href="#">Pomiar V</a> , <a href="#">Pomiar V</a> , <a href="#">Pomiar V</a>
Goto	3	<a href="#">midpoint pressure perturbation2</a> , <a href="#">midpoint pressure perturbation</a> , <a href="#">midpoint pressure perturbation2</a>
From	3	<a href="#">Temp zadana</a> , <a href="#">Temp wskaz czuj</a> , <a href="#">Temp zadana</a>
Controlled Temperature Source (m)	3	<a href="#">Controlled Temperature Source1</a> , <a href="#">Controlled Temperature Source2</a> , <a href="#">Controlled Temperature Source1</a>
Variable Thermal Resistance (m)	2	<a href="#">Variable Thermal Resistance</a> , <a href="#">Variable Thermal Resistance1</a>
Thermal Mass (m)	2	<a href="#">Masa czujnika i obudowy</a> , <a href="#">Masa czujnika i obudowy1</a>
Temperature Sensor (m)	2	<a href="#">Temperature Sensor</a> , <a href="#">Temperature Sensor1</a>
Sin	2	<a href="#">Sine Wave1</a> , <a href="#">Wah.temp w.cieplej</a>
Reservoir (TL) (m)	2	<a href="#">Siec wodociagowa</a> , <a href="#">Wylewka</a>
Poppet Valve (TL) (m)	2	<a href="#">Ball Valve (TL)</a> , <a href="#">Ball Valve (TL)1</a>
Mass & Energy Flow Rate Sensor (TL) (m)	2	<a href="#">Mass &amp; Energy Flow Rate Sensor (TL)</a> , <a href="#">Mass &amp; Energy Flow Rate Sensor (TL)</a>
Flow Resistance (TL) (m)	2	<a href="#">Rury5</a> , <a href="#">Rury5</a>
Thermodynamic Properties Sensor (TL) (m)	1	<a href="#">Thermodynamic Properties Sensor (TL)</a>
Thermal Liquid Settings (TL) (m)	1	<a href="#">TL_woda</a>
Solver Configuration (m)	1	<a href="#">Solver Configuration1</a>
Product	1	<a href="#">Divide</a>
Perfect Insulator (m)	1	<a href="#">Perfect Insulator</a>

Tabela 77. Model Variables

Variable Name	Parent Blocks	Calling character vector	Value
sPar	<a href="#">Siec wodociagowa</a> <a href="#">Step1</a> <a href="#">Step</a> <a href="#">Step3</a> <a href="#">Step2</a> <a href="#">Step1</a> <a href="#">Woda uzytkowa</a> <a href="#">Woda uzytkowa1</a> <a href="#">Masa czujnika i obudowy</a> <a href="#">Masa czujnika i obudowy1</a> <a href="#">Step</a> <a href="#">Step1</a> <a href="#">Step2</a> <a href="#">Step3</a> <a href="#">Constant</a> <a href="#">Kamień na czujniku</a> <a href="#">Czujnik czysty</a> <a href="#">Constant</a> <a href="#">Constant1</a> <a href="#">Czujnik czysty</a> <a href="#">Kamień na czujniku</a> <a href="#">Masa czujnika i obudowy</a> <a href="#">Masa czujnika i obudowy1</a> <a href="#">Woda uzytkowa</a> <a href="#">Woda uzytkowa1</a> <a href="#">Woda uzytkowa2</a> <a href="#">Constant</a> <a href="#">Constant1</a> <a href="#">Step</a> <a href="#">Step1</a> <a href="#">Step2</a> <a href="#">Step3</a> <a href="#">Siec wodociagowa</a> <a href="#">Constant</a> <a href="#">Step1</a> <a href="#">Zbiornik (TL)</a>	<code>sPar.cisnSieci</code> <code>sPar.czasNagrzStart+sPar.czasNagrzDlugosc</code> <code>sPar.czasNagrzStart</code> <code>sPar.czasZmianaTempWody+sPar.czasNagrzDlugosc</code> <code>sPar.czasZmianaTempWody</code> <code>sPar.czasZmianaTempWody</code> <code>sPar.czujDlugosc*20</code> <code>sPar.czujDlugosc*20</code> <code>sPar.czujSrednZkam*0.01</code> <code>sPar.masaCzujnika</code> <code>sPar.masaCzujnika</code> <code>sPar.odcNagrzew</code> <code>sPar.odcNagrzew</code> <code>sPar.odcNagrzew</code> <code>sPar.odcNagrzew</code> <code>sPar.otwarcieZaw</code> <code>sPar.rezCzujnikCzysty+sPar.delKamienia</code> <code>sPar.rezCzujnikCzysty</code> <code>sPar.tempIni+sPar.tempDelWym</code> <code>sPar.tempIni-sPar.tempDelWym</code> <code>sPar</code> <code>sPar</code> <code>sPar</code> <code>sPar</code> <code>sPar</code> <code>sPar</code> <code>sPar</code> <code>sPar</code> <code>sPar</code> <code>sPar</code> <code>sPar</code> <code>sPar</code> <code>sPar</code> <code>sPar</code> <code>sPar</code> <code>sPar</code> <code>sPar</code> <code>sPar</code> <code>sPar</code> <code>sPar</code> <code>sPar</code>	masaCzujnika: 0.3000 delKamienia: 1 rezCzujnikCzysty: 0.0500 odecNagrzew: 10000 czasNagrzStart: 25 czasNagrzDlugosc: 2 czasZmianaTempWody: 5 tempIni: 300 tempDelWym: 5 cisnSieci: 6 otwarcieZaw: 0.0100 czujSredn: 1 czujPole: 0.7854 czujDlugosc: 1 czujSrednZkam: 0.9477 czujPoleZkam: 0.7054 pozStCzas: 0.6320

## Załącznik 4

*Uzyskany patent na wynalazek*



## **Załącznik 5**

### *Osiągnięcia:*

- Rozwiązanie jest wersją rozwojową urządzenia, które było opracowywane na potrzeby projektu realizowanego w ramach NCBiR pod nazwą „Prace badawczo-rozwojowe nad innowacyjnym wielofunkcyjnym urządzeniem sanitarnym” (Program Operacyjny Inteligentny Rozwój, Poddziałanie: Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa; Numer projektu: POIR.01.01.01-00-0327/17, Wartość projektu: 10 560 399.88. zł).
- Złoty medal podczas Międzynarodowych Targów Wynalazków Kaohsiung International Invention and Design EXPO 2020 (KIDE) na Tajwanie.
- Srebrny medal podczas Wystawy Wynalazków IIDC – International Invention and Design Competition 2020 w Hongkongu.
- Prezentacja na żywo w „Dzień dobry TVN” w telewizji TVN (<https://dziendobry.tvn.pl/a/polscy-naukowcy-wymyslili-inteligentny-prysznic-mozna-rozpoznawac-twarz-a-na-podstawie-tego-wyswietlac-ulubiony-film>)