

Analizy porównawcze pomiarów temperatury powierzchni

Streszczenie. Analizy porównawcze pomiarów temperatury powierzchni wykonano na podstawie wyników badań wykonanych na stanowisku badawczym z wymiennymi foliami ze stopów Haynes-230 i Hastelloy X, o różnych grubościach. Podczas eksperymentów realizowano pomiar temperatury metodą kontaktową (czujnikami rezystancyjnymi i termoelementami) oraz metodą bezkontaktową (dwie kamery termowizyjne). Tor pomiarowy zawierał termometr o wysokiej dokładności współpracujący z czujnikiem RTD 1/10 DIN (o klasie B) oraz kalibrator podczerwieni.

Abstract. Comparative analyses of surface temperature measurements were performed based on research results obtained at a test station with exchangeable foils made of Haynes-230 and Hastelloy X alloys, varying in thickness. During the experiments, temperature measurements were carried out using the contact method (resistance sensors and thermocouples) and the contactless method (two infrared cameras). The measurement setup included a high-precision thermometer working with an RTD sensor (B class) and an infrared calibrator. (**Comparative analyses of surface temperature measurements**).

Słowa kluczowe: pomiar temperatury powierzchni, czujnik RTD, termoelement, kamera termowizyjna.

Keywords: temperature measurement, RTD sensor, thermocouple, infrared camera.

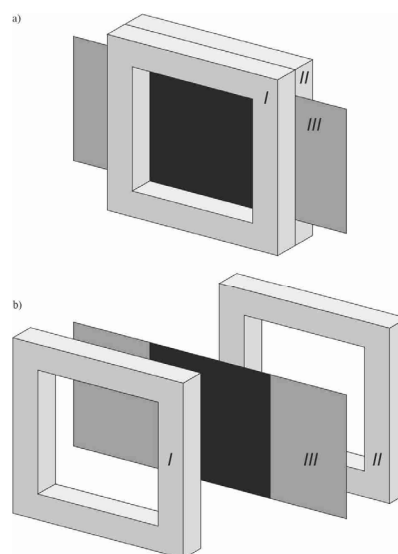
Wstęp

Termometria to dziedzina metrologii zajmująca się pomiarami temperatury i powiązanych z nią wielkości. Obejmuje szereg zagadnień związanych z pomiarami, takimi jak skale i jednostki temperatury, techniki i metody pomiaru, budowa przyrządów i metody ich wzorcowania. Można wykazać ogromne znaczenie termometrii w takich dziedzinach jak opieka zdrowotna, produkcja i zaawansowane technologie, środowisko oraz bezpieczeństwo pracowników w miejscu pracy. Warto podkreślić, iż techniki pomiarowe stale się zmieniają i ten fakt, wraz z szybkim postępem technologicznym, wzmacnia zapotrzebowanie na dokładne i niezawodne produkty metrologiczne. Niemal w każdej dziedzinie techniki do punkтового pomiaru temperatury stosowane są czujniki termoelektryczne. Z kolei, do pomiaru rozkładu temperatury na powierzchni, powszechnie wykorzystywana jest metoda termografii w podczerwieni. Ze względu na mobilność urządzeń i wygodny do przeprowadzenia pomiar oraz szerokie możliwości aplikacyjne kamer termowizyjnych w licznych dziedzinach przemysłu i życia, takich jak: energetyka, budownictwo, medycyna, diagnostyka maszyn, badania środowiska, przyrządy te stają się coraz bardziej powszechne. Warto podkreślić, iż bardzo istotnym zagadnieniem towarzyszącym pomiarowi temperatury jest ocena dokładności pomiarów. Z uwagi na wiarygodność pomiarów temperatury z wykorzystaniem różnych metod i technik pomiarowych, niezbędne jest przeprowadzenie oceny dokładności, w oparciu o uznane przez środowisko metrologiczne pojęcia błędów i niepewności, często odnoszone jedynie do czujników pomiarowych, a rzadko - do torów pomiarowych. W publikacjach [1]–[3], autorzy uważają skoncentrowali na czujnikach kontaktowych do pomiaru temperatury. W [1] omówiono procedurę kalibracji termistora NTC, procedurę kalibracji termoelementu typu K przedstawiono w [2], a praca [3] dotyczy czujników RTD. Autorzy niniejszej pracy prowadzili pomiary temperatury powierzchni techniką termografii w podczerwieni, termografią ciekłokrystaliczną oraz czujnikami termoelektrycznymi, przy czym ważną część niektórych z publikacji stanowiło oszacowanie niepewności pomiaru temperatury, opisane przykładowo w publikacjach [4]–[10]. Przedmiotem szczególnego zainteresowania autorów jest analiza dokładności pomiarów temperatury dla metody kontaktowego pomiaru temperatury (pomiary punktowe przy wykorzystaniu czujników termoelektrycznych) oraz pomiaru

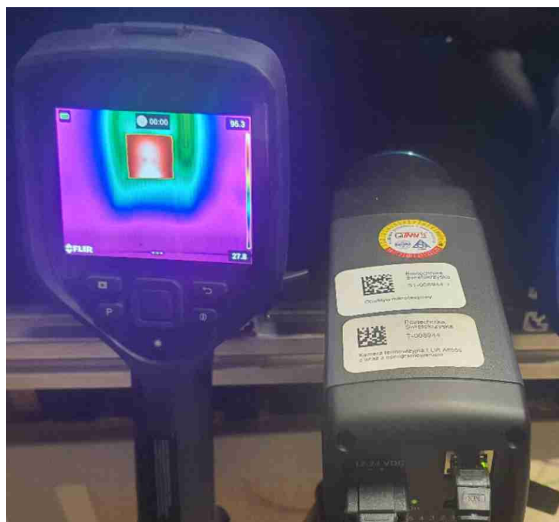
bezkontaktowego z wykorzystaniem kamer termowizyjnych. Pomiary dotyczyły powierzchni ciała stałego (folia metalowa), a przeprowadzone analizy miały charakter porównawczy. Na podstawie analizy budżetu niepewności dla różnych torów pomiarowych wyznaczono niepewności rozszerzone pomiarów temperatury stosując prawo propagacji niepewności i metodę Monte Carlo. Wyznaczono podstawowe parametry statystyczne danych pomiarowych. Przeprowadzone badania wykazały niewielkie różnice w wynikach pomiarów uzyskanych testowanymi metodami.

Stanowisko eksperymentalne

Na stanowisku do badań eksperymentalnych przeprowadzono jednoczesne pomiary termoelementami typu T i K [11, 12] oraz kamerami termowizyjnymi firmy FLIR [13, 14]. Eksperymenty wykonano z wykorzystaniem modułu testowego, którego podstawową część stanowiła cienka folia metalowa. Schemat modułu testowego pokazano na Rys. 1. Widok stanowiska od strony wykonywania pomiarów termowizyjnych pokazano na Rys. 2, natomiast od strony podłączenia czujników termoelektrycznych - na Rys. 3.



Rys. 1. Schemat modułu testowego stanowiska z folią metalową: a) widok, I) pokrywa przednia II) korpus, III) folia z superstopu Haynes-230 lub Hastelloy-X, b) rysunek złozeniowy



Rys. 2. Widok stanowiska od strony wykonywania pomiarów termowizyjnych



Rys. 3. Widok stanowiska od strony podłączenia czujników termoelektrycznych, z lewej strony pokazano kalibrator do kamer termowizyjnych

Podstawową część modułu testowego stanowi wymienna folia metalowa wykonana ze stopów: Haynes-230 [15], o grubości 0,1 mm i 0,45 mm oraz Hastelloy-X [16], o grubości 0,65 mm. Powierzchnia folii ze strony, na której realizowano pomiary termowizyjne, została pokryta farbą o znanej emisyjności 0,98 (grafitowa farba podkładowa SPBB Sprayable Black Backing firmy LCRHallcrest), ze względu na pomiary termografii w podczerwieni.

Charakterystykę kamer termowizyjnych, wykorzystanych do pomiarów temperatury przedstawiono w Tabeli 1. Do przeciwległej powierzchni folii stykowo przymocowano cztery termoelementy: dwa czujniki termoelektryczne typu T i kolejne dwa - typu K (Tabela 3) oraz dwa precyzyjne czujniki rezystancyjne Pt-100 o dokładności 1/10 DIN klasy B (Tabela 4) [17]. Powierzchnia styku czujników z folią została pokryta cienką warstwą pasty termoprzewodzącej AG Silver [18] o minimalnej przewodności cieplnej wynoszącej 3,8 W/(m K) i impedancji termicznej mniejszej niż 0,067 °C inch²/W. Do podłączenia czujników termoelementów z miernikiem wykorzystano ekranowane linie czteroprzewodowe o długości 2000 mm, co pozwoliło na pominięcie wpływu rezystancji przewodów na dokładność realizowanego pomiaru temperatury (wg EA-4/02 M:2022 [19]). Równolegle, w odległości 10 cm od modułu testowego, ustawiono kalibrator T-30NIR z czujnikiem rezystancyjnym Pt 100 Klasy A (Tabela 4), przy czym wszystkie elementy umieszczono w pojemniku.

Tabela 1. Charakterystyka kamer termowizyjnych

Charakterystyka	Model kamery termowizyjnej	
	FLIR E96 [13]	FLIR A655sc [14]
Rozdzielczość	640 x 480 pikseli	
Czułość termiczna	<40 mK w 30 °C	< 30 mK
Minimalna odległość	0,15 m	0,25 m
Zakres temperatury mierzonego obiektu	od -20 do 120 °C od 0 do 650 °C od 300 do 1500 °C	od -40 do 150 °C od 100 do 650 °C
Dokładność pomiaru	±2 °C lub 2 % wartości mierzonej	
Temperatura pracy	od -15 do 50 °C	
Maksymalna wartość wilgotności podczas pracy	IEC / EN 60950-1 IEC / EN 62368-1	IEC 60068 - 230 / 24 h 95% RH w 25°C do 40°C
Wymiary	278,4 x 116,1 x 113,1 mm	216 x 73 x 75 mm

w badaniach wykorzystano kalibrator kamer termowizyjnych T-30NIR, firmy PRESYS [20], którego charakterystykę przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2. Charakterystyka kalibratora kamer termowizyjnych T-30NIR [20]

Charakterystyka/wymiary	Wartości
Zakres pomiarowy	od -30 do 150 °C
Dokładność z odniesieniem wewnętrznym	± 0,4 °C
Dokładność z zewnętrznym termometrem	± 0,1 °C
Rozdzielczość	0,1 °C
Stabilność urządzenia	< 0,1 °C
Czas nagrzewania	15 minut (od 25 °C do 150 °C)
Czas chłodzenia	25 minut (od 25 °C do -30 °C)
Średnica otworu pomiarowego	80 mm
Emisyjność powierzchni	0,98

Układ pomiarowy pozwolił na jednoczesną rejestrację pól temperatury powierzchni folii pokrytej farbą o znanej emisyjności oraz powierzchni otworu kalibracyjnego kalibratora T-30NIR, przy użyciu dwóch kamer termowizyjnych. Kamery termowizyjne ustawiono w odległości 1 m. W celu uniknięcia refleksów cieplnych, przestrzeń komory od wewnątrz została pokryta czarną matową farbą. Podczas badań kamery termowizyjne zabezpieczono przed odbiciami stosując dodatkowe okrycia.

Metodyka badań eksperymentalnych

Przed wykonaniem badań, dzięki pracy zestawu klimatyzacyjnego i nawilżacza, zapewniono równomierny rozkład temperatury powietrza oraz założoną wilgotność w pomieszczeniu, stabilizując je przez około 12 godzin. Kolejne wartości temperatury zadawano (czujnik temperatury urządzenia klimatyzacyjnego w pomieszczeniu laboratorium. Pomiary wykonywano w stabilnych warunkach, przy włączonej klimatyzacji oraz nawilżacz powietrza. Podstawowe parametry powietrza w pomieszczeniu, w tym temperatura, wilgotność względna i ciśnienie atmosferyczne mierzono i zapisywano przy użyciu rejestratora LAB-EL typu LB-532 [21]. Po ustabilizowaniu parametrów powietrza, odczytywano temperaturę folii z pomiaru dwoma czujnikami rezystancyjnymi na urządzeniu STA-510-DT [22] i ustawiano wskazywaną przez nie średnią temperaturę (zaokrągloną do 0,1 °C) na urządzeniu T-30NIR. Po odczekaniu minimum 30 minut, rozpoczynano pomiary. Wykonano 600 pomiarów z interwałem czasowym wynoszącym 1 sekundę. Dwa termoelementy typu K i dwa termoelementy typu T przymocowano do folii z wykorzystaniem pasty termoprzewodzącej (cienka warstwa na styku z folią), po przeciwległej stronie w stosunku do wykonywanych pomiarów termowizyjnych.

Tabela 3. Charakterystyka testowanych termoelementów

Oznaczenie termoelementu	Typ	Dokładność termoelementu [23], °C	Producent termoelementu	Zakres pomiarowy termoelementu, °C	Długość czujnika L, mm	Średnica czujnika Ø, mm	
TT0010	T	* 0,5 lub 0,004· t	Guenther [11]	-100	300	400	0,5
TT0044			CZAKI Thermo-Product [12]	-40	300	200	0,5
TK0024	K	* 1,5 lub 0,004· t		-40	600	100	0,5
TK0105				-40	1100	150	3

* t – temperatura w °C

Tabela 4. Charakterystyka czujników rezystancyjnych podłączonych do przyrządów STA-510-DT oraz T-30NIR

Oznaczenie czujnika RTD	Typ	Dokładność czujnika RTD [24], °C	Podłączenie czujnika RTD do urządzenia	Zakres pomiarowy czujnika RTD, °C	Długość czujnika L, mm	Średnica czujnika Ø, mm	
RP10091	Pt-100	* 0,03 lub 0,0005· t	STA-510-DT	-50	250	150	4
RP10102				-50	250	300	5
RP10087			T-30NIR	-40	180	170	3

* t – temperatura w °C

Akwizycję wartości temperatury mierzonej przez termoelementy zapewniła stacja akwizycji danych pomiarowych IOtech DaqLab 2005 [25], współpracująca z oprogramowaniem DAQView. Przewody kompensacyjne, łączące termoelementy z stacją akwizycji, posiadały długość 5 m. Dwa czujniki rezystancyjne (o dokładności 1/10 DIN klasy B) podłączono do miernika o wysokiej dokładności pomiaru temperatury STA-510-DT, firmy PRESYS.

W Tabeli 5 przedstawiono dane uwzględnione w eksperymentach, obejmujące wskazanie materiału folii i jej grubości oraz zadanych temperatur w pomieszczeniu.

Tabela 5. Charakterystyka serii pomiarowych realizowanych w eksperymentach

Nr	Materiał	Grubość, mm	Temperatura, °C
1	Haynes-230 [15]	0,1	18
2			20
3			22
4			24
5		0,45	18
6			20
7			22
8			24
9	Hastelloy-X [16]	0,65	18
10			20
11			22
12			24

Analiza porównawcza pomiarów temperatury otrzymanych z eksperymentów i szacowanie niepewności pomiarowych

Do analizy przyjęto wyniki otrzymane z eksperymentów przeprowadzonych z wykorzystaniem trzech folii różniących się grubością (wykonanych z superstopu Haynes-230 lub Hastelloy-X), dla czterech wartości temperatury powietrza, zadanych w pomieszczeniu: 18 °C, 20 °C, 22 °C i 24 °C. W zastosowanej metodzie obliczeniowej uwzględniono błędy związane z poszczególnymi elementami toru pomiarowego, przy czym rozważano je w następujących torach pomiarowych: (i) czujniki RTD podłączone do urządzenia pełniące funkcję stacji akwizycji danych pomiarowych, (ii) czujnik RTD podłączony do kalibratora kamer termowizyjnych oraz (iii) termoelementy podłączone do stacji akwizycji danych pomiarowych.

(i) Błędy dotyczące elementów toru pomiarowego temperatury: czujniki RTD podłączone do urządzenia pełniące funkcję stacji akwizycji danych

Rezultat pomiaru temperatury t_{ij} , RTD, przeprowadzonego za pomocą czujników rezystancyjnych Pt-100 klasy dokładności 1/10 DIN B, podłączonych do urządzenia PRESYS STA-510-DT, obciążonego błędami pomiarowymi, opisano następującą zależnością:

$$(1) t_{ij,RTD} = t_{i,RTD} + \delta_{i,RTD} + \delta_{STA} + \delta_s + \delta_{r,STA} + \delta_{ot} + \delta_{Age}$$

W Tabeli 6 wyjaśniono elementy występujące we wzorze (1), w tym szczegółowo opisano błędy pomiarowe przyjęte w metodzie oszacowania niepewności pomiaru temperatury.

(ii) Błędy dotyczące elementów toru pomiarowego temperatury: czujnik RTD podłączony do kalibratora kamer termowizyjnych

Temperaturę t_{iref} na wyjściu kalibratora podczerwieni T-30NIR w chwili, gdy wskazanie wbudowanego termometru równa się k-tej temperaturze zadanej t_{kz} , określa się za pomocą czujnika RTD umieszczonego w kalibratorze, stykającym się z powierzchnią o znanej emisyjności. Temperaturę tę opisano poniższą zależnością:

$$(2) t_{iref} = t_{kz} + \delta_a + \delta_s + \delta_{r,NIR} + \delta_{i,RTD} + \delta_{ot} + \delta_{Age}$$

Elementy występujące we wzorze (2) opisano w Tabeli 7.

(iii) Błędy dotyczące elementów toru pomiarowego temperatury: termoelementy podłączone do stacji akwizycji danych pomiarowych

Rezultat pomiaru temperatury, wykonanego za pomocą termoelementów typu K i T podłączonych do stacji akwizycji danych pomiarowych IOtech DaqLab 2005, obciążonego błędami pomiarowymi, opisano zależnością:

$$(3) t_{ij,TC} = t_{i,TC} + \delta_{j,T} + \delta_s + \delta_{j,K} + \delta_{DAS} + \delta_{r,DAS} + \delta_{ot} + \delta_{Age}$$

W Tabeli 8 wyjaśniono elementy występujące we wzorze (3), w tym szczegółowo opisano błędy pomiarowe przyjęte w metodzie oszacowania niepewności pomiaru temperatury.

W kolejnych trzech tabelach przedstawiono budżety niepewności dla poszczególnych elementów każdego z rozważanych torów pomiarowych, oznaczonych (i), (ii) oraz (iii). Zatem:

- Tabela 9 pokazuje budżet niepewności dla elementów toru pomiarowego (i): czujniki RTD podłączone do termometru STA-510-DT, pełniące funkcję stacji akwizycji danych pomiarowych;
- W Tabeli 10 przedstawiono budżet niepewności dla elementów toru pomiarowego (ii): czujnik rezystancyjny podłączony do kalibratora kamer termowizyjnych T-30NIR;
- Tabela 11 dotyczy elementów toru pomiarowego (iii): termoelementy podłączone do stacji akwizycji danych pomiarowych IOtech DaqLab 2005.

Tabela 6. Opis elementów we wzorze (1) dotyczących elementów toru pomiarowego (i): czujniki RTD podłączone do termometru STA-510-DT

Oznaczenie	Opis	Wartości
$t_{ij, RTD}$	i -ta temperatura obciążona błędami pomiarowymi podczas pomiaru przez j -ty czujnik RTD	
t_i, RTD	i -ta temperatura mierzona przez czujnik RTD podłączony do termometru STA-510-DT	
$\delta t_{i, RTD}$	Błąd czujnika RTD wg. PN-EN 60751:2009 [24] dla i -tej temperatury, gdzie t – temperatura w °C	$\pm (0,03+0,0005 \cdot t)$ °C
δt_{STA}	Błąd pomiaru temperatury ze względu na dokładność termometru STA-510-DT [22]	$\pm 0,01$ °C
δt_s	Błąd stabilności temperatury termometru STA-510-DT w czasie pomiaru [22]	$\pm 0,10$ °C
$\delta t_{r, STA}$	Błąd pomiaru temperatury związany z rozdzielczością termometru STA-510-DT podczas pomiaru czujnikami RTD [17]	$\pm 0,001$ °C
δt_{tot}	Błąd związany ze stabilnością temperatury otoczenia w czasie pomiaru [21]	$\pm 0,1$ °C
δt_{Age}	Błąd wynikający z możliwej zmiany wskazania wartości temperatury od czasu jego ostatniego wzorcowania, spowodowany starzeniem się materiału czujnika RTD [24]	$\pm 0,02$ °C

Tabela 7. Opis elementów we wzorze (2) dotyczących elementów toru pomiarowego (ii): czujnik RTD podłączony do kalibratora T-30NIR

Oznaczenie	Opis	Wartości
t_{iref}	i -ta temperatura powierzchni o znanej emisyjności zmierzona czujnikiem RTD klasy dokładności A	
t_{kz}	k -ta temperatura zadana na wejściu kalibratora T-30NIR	
δt_a	Błąd dokładności kalibratora podczerwieni T-30NIR [20]	$\pm 0,1$ °C
δt_s	Błąd stabilności kalibratora T-30NIR dla pomiaru temperatury powierzchni o znanej emisyjności [20]	$\pm 0,1$ °C
$\delta t_{r, Nir}$	Błąd związany z rozdzielczością kalibratora T-30NIR dla pomiaru temperatury [20]	$\pm 0,01$ °C
$\delta t_{i, RTD}$	Błąd czujnika RTD wg. PN-EN 60751:2009 [17] dla i -tej temperatury, gdzie t – temperatura w °C	$\pm (0,15+0,002 \cdot t)$ °C
δt_{tot}	Błąd związany ze stabilnością temperatury otoczenia w czasie pomiaru [21]	$\pm 0,1$ °C
δt_{Age}	Błąd wynikający z możliwej zmiany wskazania wartości temperatury od czasu jego ostatniego wzorcowania, spowodowany starzeniem się materiału czujnika RTD PN-EN 60751:2009 [24]	$\pm 0,02$ °C

Tabela 8. Opis elementów we wzorze (3) dotyczących elementów toru pomiarowego (iii): termoelementy podłączone do stacji akwizycji danych IOtech DaqLab 2005

Oznaczenie	Opis	Wartości
$t_{ij, TC}$	i -ta temperatura obciążona błędami pomiarowymi podczas pomiaru przez j -ty termoelement (badany termoelement typu K lub typu T)	
t_i, TC	i -ta temperatura mierzona przez termoelement podłączony do stacji IOtech DaqLab 2005	
δt_{jT}	Błąd pomiaru temperatury j -tego termoelementu typu K oraz typu T wg. PN-EN 60584-1:2014-04 [23]	$\pm 1,50$ °C typ K $\pm 0,50$ °C typ T
δt_s	Błąd stabilności pomiaru temperatury z wykorzystaniem stacji pomiarowej IOtech DaqLab 2005 w czasie pomiaru, odczytany na podstawie zmian wskazań temperatury na dedykowanym kanale stacji [25]	$\pm 0,10$ °C
δt_{jK}	Błąd pomiaru temperatury z wykorzystaniem j -tego przewodu kompensacyjnego, wg. PN-EN IEC 60584-3:2021-11 [26], dla przewodów kompensacyjnych typu: K typu T	$\pm 1,50$ °C typ K $\pm 0,50$ °C typ T
δt_{DAS}	Błąd związany z dokładnością pomiaru temperatury z wykorzystaniem stacji pomiarowej IOtech DaqLab 2005 [25]	$\pm 0,80$ °C
$\delta t_{r, DAS}$	Błąd pomiaru temperatury związany z rozdzielczością stacji pomiarowej IOtech DaqLab 2005 dla pomiarów termoelementami [25]	$\pm 0,1$ °C
δt_{tot}	Błąd spowodowany związanymi ze stabilnością temperatury otoczenia w czasie pomiaru [21]	$\pm 0,1$ °C
δt_{Age}	Błąd pomiaru temperatury spowodowany starzeniem się elektroniki stacji pomiarowej IOtech DaqLab 2005, na podstawie dokumentacji producenta [25]	$\pm 0,02$ °C

Tabela 9. Budżet niepewności wg EA-4/02 M:2022 [19] dla elementów toru pomiarowego (i): czujniki RTD podłączone do STA-510-DT

Symbol wielkości X_i	Estymata wielkości x_i	Niepewność standardowa $u(x_i)$	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości c_i	Udział niepewności $u_i(y)$
$\delta t_{i, RTD}$	0,0 °C	0,042 °C	prostokątny	1,0	0,042 °C
δt_{STA}	0,0 °C	0,006 °C	prostokątny	1,0	0,006 °C
δt_s	0,0 °C	0,058 °C	prostokątny	1,0	0,058 °C
$\delta t_{r, STA}$	0,0 °C	0,0003 °C	prostokątny	1,0	0,0003 °C
δt_{tot}	0,0 °C	0,029 °C	prostokątny	1,0	0,029 °C
δt_{Age}	0,0 °C	0,006 °C	prostokątny	1,0	0,006 °C

Tabela 10. Budżet niepewności wg EA-4/02 M:2022 [19] dla elementów toru pomiarowego (ii): czujnik RTD podłączony do kalibratora T-30NIR

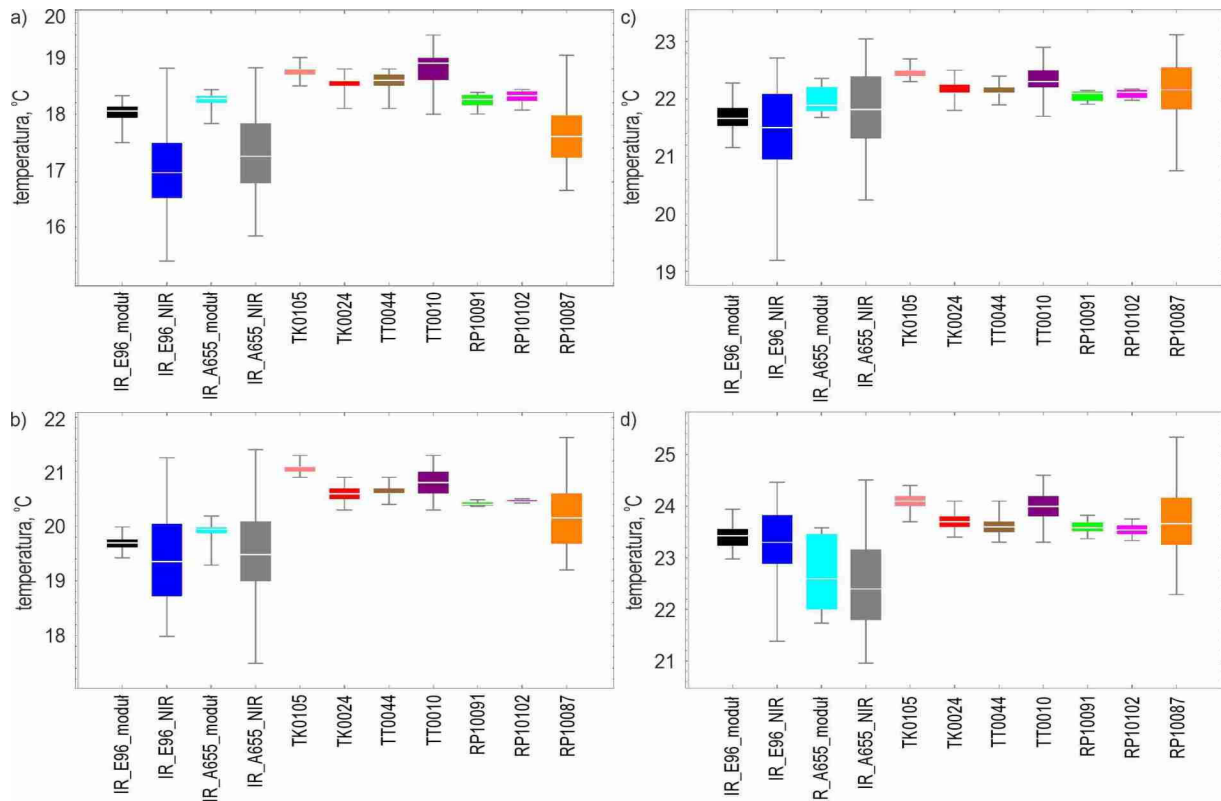
Symbol wielkości X_i	Estymata wielkości x_i	Niepewność standardowa $u(x_i)$	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości c_i	Udział niepewności $u_i(y)$
δt_a	0,0 °C	0,058 °C	prostokątny	1,0	0,058 °C
δt_v	0,0 °C	0,058 °C	prostokątny	1,0	0,058 °C
$\delta t_{r, NIR}$	0,0 °C	0,003 °C	prostokątny	1,0	0,003 °C
$\delta t_{i, RTD}$	0,0 °C	0,114 °C	prostokątny	1,0	0,114 °C
δt_s	0,0 °C	0,058 °C	prostokątny	1,0	0,058 °C
δt_{tot}	0,0 °C	0,029 °C	prostokątny	1,0	0,029 °C
δt_{Age}	0,0 °C	0,006 °C	prostokątny	1,0	0,006 °C

Tabela 11. Budżet niepewności wg EA-4/02 M:2022 [19] dla elementów toru pomiarowego (iii): termoelementy podłączone do stacji akwizycji danych pomiarowych IOtech DaqLab 2005

Symbol wielkości X_i	Estymata wielkości x_i	Niepewność standardowa $u(x_i)$	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości c_i	Udział niepewności $u_i(y)$
$\delta t_{jT, T}$	0,0 °C	0,289 °C	prostokątny	1,0	0,289 °C
$\delta t_{jT, K}$	0,0 °C	0,866 °C	prostokątny	1,0	0,866 °C
δt_s	0,0 °C	0,058 °C	prostokątny	1,0	0,058 °C
$\delta t_{jK, T}$	0,0 °C	0,289 °C	prostokątny	1,0	0,289 °C

Symbol wielkości X_i	Estymata wielkości x_i	Niepewność standardowa $u(x_i)$	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości c_i	Udział niepewności $u_i(y)$
$\delta t_{JK, K}$	0,0 °C	0,866 °C	prostokątny	1,0	0,866 °C
δt_{DAS}	0,0 °C	0,462 °C	prostokątny	1,0	0,462 °C
$\delta t_{r, DAS}$	0,0 °C	0,029 °C	prostokątny	1,0	0,029 °C
δt_{tot}	0,0 °C	0,029 °C	prostokątny	1,0	0,029 °C
δt_{Age}	0,0 °C	0,006 °C	prostokątny	1,0	0,006 °C

$\delta t_{T, T}$ – dla termoelementów typu T, $\delta t_{T, K}$ – dla termoelementów typu K



Rys 4. Wyniki pomiarów temperatury otrzymanych z różnych metod pomiaru i urządzeń przedstawione w formie wykresu pudełkowego Tukeya [29]; folia ze stopu Haynes-230, grubość 0,1 mm; temperatura zadana: 18 °C (a) i 20 °C (b) 22 °C (c) i 24 °C (d)

Wyniki

Korzystając z prawa propagacji niepewności wielkości nieskorelowanych wg JCGM 100:2008 [27] oraz metody Monte Carlo, podobnie jak w pracach [5, 28], wyznaczono niepewność rozszerzoną.

Najważniejsze rezultaty badań eksperymentalnych przedstawiono jako wykresy pudełkowe, przedstawiające zestawienia danych pomiarowych (minimum, pierwszy kwartyl, mediana, trzeci kwartyl i maksimum). Wyniki dotyczące eksperymentu z wykorzystaniem folii z superstopu Haynes-230, o grubości 0,1 mm, przedstawiono na Rys. 4, dla każdej z czterech zadanych wartości temperatury, tj.: 18 °C (Rys. 4a), 20 °C (Rys. 4b), 22 °C (Rys. 4c) i 24 °C (Rys. 4d).

Analogicznie uzyskano wyniki dla pozostałych serii pomiarowych, tj. z folią Haynes-230 o grubości 0,45 mm. Na serię pomiarową dla każdej z testowanych folii składały się wyniki trzymane dla czterech zadanych wartości temperatury, tj. 18 °C, 20 °C, 22 °C i 24 °C.

Podstawowe parametry statystyczne (minimum, pierwszy kwartyl, mediana, trzeci kwartyl i maksimum, rozstęp kwartylowy, odchylenie standardowe, wariancja, średnia) oraz wartości niepewności rozszerzonych pomiaru temperatury, obliczonych z wykorzystaniem prawa propagacji niepewności (PP) oraz metody Monte Carlo (MC) przedstawiono w Tabelach 12 oraz 13.

Niepewności pomiarów temperatury wyznaczono podobnie jak w pracy [5], stosując prawo propagacji niepewności oraz metodę Monte Carlo. W obliczeniach opartych na prawie propagacji niepewności współczynnik rozszerzenia k , niezbędny do obliczenia niepewności rozszerzonej na poziomie ufności 0,95, był zależny od metody pomiaru temperatury. W przypadku zastosowania czujników stykowych w torze pomiarowym założono rozkład normalny wielkości wyjściowej i przyjęto $k = 1,96$. Natomiast przy pomiarach temperatury za pomocą kamer IR przyjęto rozkład prostokątny wielkości wyjściowej (pokrywający się z rozkładem dominującej składowej niepewności) i wartość $k = 1,65$. Metoda Monte Carlo, pozwoliła na obliczenie kwantyla rzędu 0,975, co umożliwiło wyznaczenie prawego krańca przedziału ufności dla wielkości wyjściowej na poziomie ufności 0,95.

Wyniki zamieszczone w Tabeli 12 dotyczą eksperymentów z wykorzystaniem folii ze stopu Haynes-230 o grubości 0,1 mm, podczas gdy temperatura zadana wynosiła 18 °C, a Tabeli 13 dotyczy eksperymentu z folią ze stopu Hastelloy-X o grubości 0,65 mm, gdy zadano temperaturę 24 °C.

Oznaczenia na Rys. 4 oraz stosowane w Tabelach 12 i 13, dotyczą pomiarów temperatury realizowanych: -> metodą bezkontaktową:

- IR_96-moduł – pomiaru rozkładu temperatury na powierzchni folii, realizowanego za pomocą kamery termowizyjnej E96;
 - IR_96-NIR – pomiaru rozkładu temperatury na powierzchni otworu kalibracyjnego urządzenia do kalibracji kamer termowizyjnych T-30NIR, realizowanego za pomocą kamery termowizyjnej E96;
 - IR_A655-moduł – pomiaru rozkładu temperatury na powierzchni folii, realizowanego za pomocą kamery termowizyjnej A655sc;
 - IR_A655-NIR – pomiaru rozkładu temperatury na powierzchni otworu kalibracyjnego kalibratora T-30NIR, realizowanego za pomocą kamery termowizyjnej A655sc;
- > metodą kontaktową:

- TK0105, TK0024, TT0044, TT0010 – punktowego pomiaru temperatury powierzchni folii za pomocą czujnika termoelektrycznego typu K o numerze TK0105 oraz TK0024 i typu T o numerze TT0044 oraz TT0010;
- RP10091, RP10102 – punktowego pomiaru temperatury powierzchni folii, realizowanego za pomocą czujnika rezystancyjnego Pt-100 o numerze RP10091 oraz RP10102;
- RP10087 – pomiaru temperatury powierzchni otworu kalibracyjnego urządzenia do kalibracji kamer termowizyjnych T-30NIR, realizowanego za pomocą czujnika rezystancyjnego Pt-100 o numerze RP10087.

Tabela 12. Analizy statystyczne pomiarów temperatury, folia ze stopu Haynes-230 o grubości 0,1 mm; temperatura zadana 18 °C

Parametry statystyczne	Kamera termowizyjna FLIR				Termoelementy				Czujniki rezystancyjne		
	IRE96, m	IRE96, NIR	IRA655, m	IRA655, NIR	TK0105	TK0024	TT0044	TT0010	RP10091	RP10102	RP10087
Liczność	596	596	687	600	600	600	600	600	600	600	600
Minimum (Min)	17,67	15,60	18,04	16,04	18,70	18,30	18,30	18,20	18,201	18,273	16,85
Pierwszy Kwartyl	18,14	16,71	18,40	16,97	18,90	18,70	18,70	18,80	18,359	18,429	17,43
Mediana	18,25	17,16	18,48	17,45	19,00	18,80	18,80	19,10	18,463	18,5275	17,80
Trzeci Kwartyl	18,33	17,68	18,52	18,035	19,00	18,80	18,90	19,20	18,541	18,598	18,18
Maksimum (Max)	18,53	19,01	18,63	19,02	19,20	19,00	19,00	19,60	18,582	18,637	19,24
Rozstęp Kwartylowy	0,20	0,97	0,13	1,06	0,10	0,10	0,20	0,40	0,182	0,169	0,75
Max-Min	0,83	3,41	0,60	2,98	0,50	0,70	0,70	1,40	0,381	0,364	2,39
Średnia	18,23	17,27	18,45	17,53	18,97	18,73	18,78	19,01	18,443	18,507	17,87
Odchylenie standardowe	0,16	0,81	0,13	0,75	0,08	0,17	0,15	0,27	0,111	0,105	0,55
Wariancja	0,02	0,66	0,02	0,57	0,01	0,02	0,02	0,07	0,012	0,011	0,30
Niepewność rozszerzona metoda PP, $k_{IR}=1,65$; $stykowe=1,96$	1,91	1,91	1,91	1,91	2,57	2,57	1,21	1,21	0,123	0,123	0,243
Niepewność rozszerzona, metoda Monte Carlo	1,90	1,90	1,89	1,90	2,51	2,45	1,19	1,18	0,113	0,112	0,23

Tabela 13. Analizy statystyczne pomiarów temperatury, folia ze stopu Hastelloy-X o grubości 0,65 mm; temperatura zadana 24 °C

Parametry statystyczne	Kamera termowizyjna FLIR				Termoelementy				Czujniki rezystancyjne		
	IRE96, m	IRE96, NIR	IRA655, m	IRA655, NIR	TK0105	TK0024	TT0044	TT0010	RP10091	RP10102	RP10087
Liczność	605	605	600	600	600	600	600	600	600	600	600
Minimum (Min)	22,91	22,16	23,02	22,48	23,50	23,00	23,00	23,10	23,446	23,436	22,960
Pierwszy Kwartyl	23,08	22,79	23,15	22,99	23,70	23,20	23,20	23,30	23,461	23,448	23,640
Mediana	23,14	23,29	23,23	23,60	23,70	23,20	23,20	23,50	23,480	23,464	23,950
Trzeci Kwartyl	23,19	23,96	23,30	24,19	23,70	23,30	23,20	23,60	23,492	23,479	24,280
Maksimum (Max)	23,36	25,35	24,05	25,45	24,00	23,40	23,40	23,80	23,495	23,483	25,400
Rozstęp Kwartylowy	0,12	1,16	0,15	1,21	0,00	0,10	0,00	0,30	0,031	0,031	0,640
Max-Min	0,46	3,19	1,03	2,97	0,50	0,40	0,40	0,70	0,049	0,047	2,440
Średnia	23,14	23,43	23,23	23,69	23,70	23,24	23,19	23,46	23,477	23,464	23,998
Odchylenie standardowe	0,08	0,79	0,10	0,78	0,07	0,08	0,07	0,16	0,016	0,015	0,517
Wariancja	0,01	0,63	0,01	0,60	0,01	0,01	0,00	0,03	0,0002	0,0002	0,267
Niepewność rozszerzona metoda PP, $k_{IR}=1,65$; $stykowe=1,96$	1,91	1,91	1,91	1,91	2,57	2,57	1,21	1,21	0,123	0,123	0,243
Niepewność rozszerzona, metoda Monte Carlo	1,91	1,89	1,91	1,92	2,51	2,53	1,18	1,17	0,113	0,113	0,232

Analizując dane przedstawione w Tabeli 12 oraz 13, jak i rezultaty otrzymane dla pozostałych serii pomiarowych zauważono, że:

- Najmniejszy rozstęp kwartylowy (IQR), nie przekraczający 0,18 °C, zaobserwowano dla czujników RTD RP10091 i RP10102 (1/10 DIN w klasie B), podłączone do urządzenia STA510 DT pełniącego funkcję stacji akwizycji danych; ponadto uzyskana średnia arytmetyczna jest równa w przybliżeniu medianie w każdym z czujników, co wskazuje na symetryczny rozkład wyników pomiarów temperatury. Ponadto mediany dla obydwu czujników

utrzymywały się na zbliżonym poziomie, co jest dowodem dużej zgodności zarejestrowanych pomiarów.

- Największe rozstępy kwartylowe (IQR) wystąpiły w pomiarach wykonanych przez kamery termowizyjne E96 i A655sc, realizowanych na powierzchni otworu kalibratora T-30NIR oraz dla czujnika rezystancyjnego RP10087, podłączonego do kalibratora kamer termowizyjnych T-30NIR.

- Dla wszystkich czujników otrzymano zbliżone wartości niepewności rozszerzonej na poziomie 0,95, obliczone metodami propagacji niepewności i Monte Carlo.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono analizy porównawcze pomiarów temperatury powierzchni, na podstawie wyników badań przeprowadzonych na stanowisku badawczym z modułem testowym, którego najważniejszy element stanowi folia metalowa. Stanowisko umożliwiło jednoczesny pomiar temperatury kilkoma metodami pomiaru. Przeprowadzono eksperymenty, w której pomiar temperatury realizowano na powierzchniach folii metalowej, wykonanymi ze stopu Haynes-230, o dwóch grubościach: 0,45 mm i 0,1 mm oraz z stopu Hastelloy X o grubości 0,65 mm. Podczas badań realizowano pomiar temperatury metodą kontaktową: czujnikami rezystancyjnymi Pt-100 i termoelementami dwóch typów oraz metodą termowizyjną z jednoczesnym wykorzystaniem dwóch kamer termowizyjnych. W eksperymentach wykorzystano termometr o wysokiej dokładności współpracujący z czujnikiem rezystancyjnym 1/10 DIN w klasie B oraz kalibrator podczerwieni. Dla wszystkich metod pomiaru temperatury otrzymano zbieżne wartości niepewności rozszerzonej na poziomie 0,95.

Autorzy: dr inż. Artur Piasecki, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Inżynierii Środowiska, Geodezji i Energetyki Odnawialnej, Katedra Inżynierii Sanitarnej, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: apiasecki@tu.kielce.pl; dr hab. Beata Maciejewska, prof. PŚK, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego, Katedra Matematyki i Fizyki, E-mail: beatam@tu.kielce.pl; prof. dr hab. inż. Magdalena Piasecka, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki Budowy Maszyn, Katedra Mechaniki i Procesów Ciepłych, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: tmpmj@tu.kielce.pl; mgr inż. Norbert Dadas, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Katedra Mechaniki i Procesów Ciepłych, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: ndadas@tu.kielce.pl

Oświadczenie

Publikacja dofinansowana ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą Polska Metrologia, nr projektu PM/SP/0031/2021/1, kwota dofinansowania 750 000 PLN, całkowita wartość projektu 848 200 PLN.



LITERATURA

- [1] Liu G., Guo L., Liu C., Wu Q., Evaluation of different calibration equations for NTC thermistor applied to high-precision temperature measurement, *Measurement*, 120 (2018), 21–27, doi: 10.1016/j.measurement.2018.02.007
- [2] Shirbhate N. J. J., Dhongade G. K. K., Calibration of K Type Thermocouple for Measurement of Temperature in Laboratory Equipment, *Int. J. Mech. Eng. Rob. Res*, 3 (2014), No. 2, 289–292
- [3] Warsza Z. L., Idzkowski A., Uncertainty Analysis of the Two-Output RTD Circuits on the Example of Difference and Average Temperature Measurements, *Mechatronics 2017 - Ideas for Industrial Applications. MECHATRONICS 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing* Springer, Cham 934 (2019), 435–446, doi: 10.1007/978-3-030-15857-6_43
- [4] Piasecka M., Maciejewska B., Piasecki A., Heat Transfer Calculations during Flow in Mini-Channels with Estimation of Temperature Uncertainty Measurements, *Energies*, 16(3) (2023), No. 1222, doi: 10.3390/en16031222
- [5] Piasecka M., Maciejewska B., Michalski D., Dadas N., Piasecki A., Investigations of Flow Boiling in Mini-Channels: Heat Transfer Calculations with Temperature Uncertainty Analyses, *Energies*, 17(4) (2024), No. 791, doi: 10.3390/en17040791
- [6] Piasecka M., Determination of the temperature field using liquid crystal thermography and analysis of two-phase flow structures in research on boiling heat transfer in a minichannel, *Metrol. Meas. Syst.*, XX (2013), No. 2, 205-216, doi: 10.2478/mms-2013-0018
- [7] Piasecka M., Maciejewska B., Piasecki A., Investigations on Boiling Heat Transfer during Flow in Mini-Channels: Error Analysis with the Use of Monte Carlo Method, chapter in: *Current Perspective to Physical Science Research*, 1 (2023), 142-173, doi: 10.9734/bpi/cppsr/v1/7307A
- [8] Maciejewska B., Piasecka M., Piasecki A., Pomiar temperatury powierzchni techniką termowizyjną i termoparami – oszacowanie niepewności pomiaru temperatury metodą Monte Carlo, rozdział w: *Metrologia badania i zastosowania*, (2022), 133-134
- [9] Piasecka M., Piasecki A., Termografia ciekłokrystaliczna w zastosowaniu do pomiaru temperatury powierzchni, rozdział w: *Metrologia badania i zastosowania*, (2022), 190-200
- [10] Michalski D., Piasecka M., Maciejewska B., Dadas N., Piasecki A., Analiza właściwości metrologicznych narzędzi pomiarowych stosowanych do pomiaru stykowego temperatury wybranymi metodami statystycznymi, rozdział w: *Metrologia*, (2023), 73-87
- [11] Güenther Polska, Karta katalogowa - Termopary płaszczowe bez rur ochronnych, Seria 21- wykonania specjalne
- [12] Czaki Thermo-Product, Karta katalogowa – Czujniki temperatury: TP-232 typ N; TP-220 typ K; TP- 231 typy T i J www.czaki.pl/content-dir/uploads/221.pdf, dostęp 10.05.2024
- [13] FLIR, a, Technical data FLIR Exx series, <https://flir.netx.net/file/asset/47237/original/attachment>, dostęp 30.04.2024
- [14] FLIR, b, FLIR A655sc, <https://flir.netx.net/file/asset/10275/original/attachment>, dostęp 03.03.2022
- [15] HAYNES® 230® alloy, Physical Properties, www.haynesintl.com/en/datasheet/haynes-230-alloy/#physical-properties, dostęp 06.08.2023
- [16] HASTELLOY® X alloy, Physical Properties, haynesintl.com/en/datasheet/hastelloy-x-alloy/#physical-properties, dostęp 06.08.2023
- [17] Pico Polska, Czujnik temperatury PT100, wysoka dokładność (Tenth-DIN class), www.picopolska.pl/akcesoria/czujnik-temperatury-pt100-wysoka-dokladnosc-tenth-din-class, dostęp 13.06.2024
- [18] Silver-PL-4.pdf, dostęp 18.07.2023 Termopasty, AG Silver, <https://termopasty.com/produkty/ag-silver/>
- [19] EA-4/02 M:2022, www.pca.gov.pl/download/gfx/pca/pl/defaultstronaopisowa/56/5/1/ea-4-02_2022.pdf, dostęp 08.11.2023
- [20] T-30NIR, Calibrator for Infrared Thermometer, Presys, <https://en.presys.com.br/wp-content/uploads/2023/07/infrared-calibrator-t-30nir-manual.pdf>, dostęp 20.09.2023
- [21] LB-532—Temperature, Humidity, Pressure, Lighting Recorder with USB Interface, www.label.pl/po/rejestrator-lb532.html, dostęp 17.07.2023
- [22] STA-510-DT, Presys, Advanced Super-Thermometer, <https://en.presys.com.br/wp-content/uploads/2023/07/super-thermometro-avancado-sta-510-rm-dt-manual.pdf>, dostęp 17.07.2023
- [23] PN-EN 60584-1:2014-04 – Termoelementy Część 1: Specyfikacje i tolerancje EMF
- [24] PN-EN 60751:2009 – Czujniki platynowe przemysłowych termometrów rezystancyjnych i platynowe czujniki temperatury
- [25] MEASUREMENT COMPUTING, User's Manual DaqLab/2000 Series – DaqLab/2005
- [26] PN-EN IEC 60584-3:2021-11 – Termoelementy Część 3: Kable rozszerzające i kompensacyjne Tolerancje i systemy rozpoznawcze
- [27] JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections), (2008)
- [28] JCGM 101:2008 Evaluation of Measurement Data — Supplement 1 to the “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”—Propagation of Distributions Using a Monte Carlo Method; Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). *Int. Organ. Stand. Geneva*, 50 (2008), 134
- [29] Tukey J.W., Exploratory Data Analysis, *Addison-Wesley Publishing Company INC*, (1977)