



Politechnika Wroclawska

Katedra Techniki Ciepłej W9/K51

Miernictwo i systemy pomiarowe – Lab

Charakterystyki wybranych termoelementów przy różnych temperaturach spoiny odniesienia

Instrukcja do ćwiczenia nr 1

Opracował: dr inż. Wiesław Wędrychowicz

Wrocław, 2021.

Wstęp teoretyczny

Termopara (nazywana również termoogniwem, termoelementem lub ogniwnem termoelektrycznym) wyróżnia się wieloma zaletami w porównaniu do innych rodzajów czujników temperatury.

W początkach XIX wieku (1821 r.) niemiecki fizyk Thomas Johann Seebeck odkrył, że styk pomiędzy dwoma metalami generuje napięcie będące funkcją temperatury. Termopara to po prostu praktyczne wykorzystanie zjawiska Seebecka.

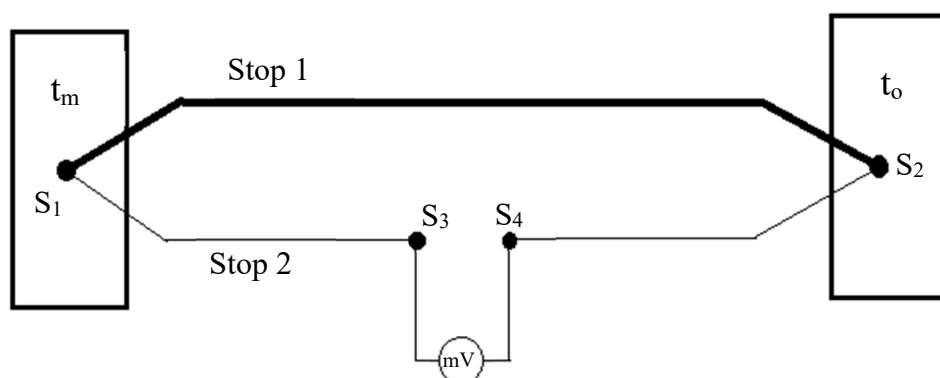
Termopara jest zatem elementem obwodu elektrycznego składającego się z dwóch przewodów wykonanych z różnych metali (mogą być metale czyste lub stopy metali).

Miejsce łączenia nazywa się „spoiną pomiarową” zaś pozostałe końce - zimnymi końcami. Przewody termoelementu nazywamy „termoelektrodami”. W tak utworzonym termoelemencie składającym się z różnych materiałów, powstaje siła termoelektryczna wtedy, gdy spoina i zimne końce utrzymywane są w różnych temperaturach. Czułość termoelementu zależy od siły termoelektrycznej materiałów, z których wykonane są termoelementy. Na termoelementy wybiera się zestawy materiałów, które w szeregu termoelektrycznym znajdują się daleko od siebie, co zapewnia występowanie dużych sił termoelektrycznych przy określonej różnicy temperatur. Właściwości typowych metali stosowanych w termoparach dają przewidywalne napięcia wyjściowe. Pozwala to użytkownikom wykorzystywać termopary w wielu zastosowaniach, w tym w środowiskach agresywnych chemicznie.

Fizyczna konstrukcja termopary jest prosta – spoiny wykonane są poprzez skręcenie, lutowanie lub spawanie drutów termoelektrod. Wszystkie metody dają podobny rezultat.

Termopary pokrywają szeroki zakres mierzonych temperatur, rozciągający się od -100°C aż do ponad 2500°C . Typowa dokładność pomiaru wynosi $\pm 1 - 2^{\circ}\text{C}$, co jest wystarczające w większości zastosowań przemysłowych.

Do wad termopar należy zaliczyć to, że napięcie wyjściowe termopary jest rzędu kilku mikrowoltów na stopień Celsjusza. Ponadto wyjście z termopary jest nieliniowe, więc konieczne jest stosowanie metod linearyzacyjnych stosowanych do konwersji napięć termopary na odczyty temperatury. Schemat połączenia termopary przedstawiono na rys. 1. Metale na tym rysunku oznaczone są jako „Stop 1” i „Stop 2” i tworzą styki S_1 i S_2 . Styk S_1 jest spoiną pomiarową, a styk S_2 tworzy drugi termoelement mierzący znaną temperaturę t_0 będącą temperaturą odniesienia.



Rys. 1. Schemat podłączenia termopary

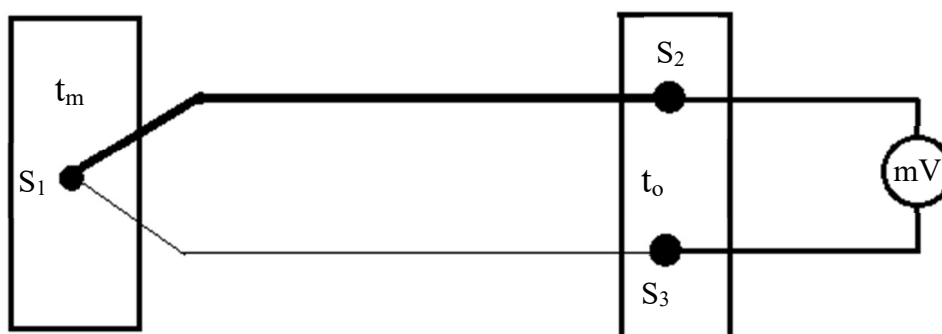
Ponieważ utrzymanie stałej, znanej temperatury spoiny odniesienia t_0 oparte było na (najłatwiejszym i najbardziej precyzyjnym sposobie stabilizacji temperatury) zanurzeniu styku odniesienia (S_2) w kąpeli lodowej, historycznie spowodowało to nadanie spoinie odniesienia nazwy „styku zimnego” lub „zimnych końców”.

Wielkość generowanego w ten sposób napięcia zależy od różnicy temperatur pomiędzy stykami S_1 i S_2 oraz od rodzajów metali użytych w stopie 1 i stopie 2. Wynik można opisać następującym równaniem:

$$V = \alpha (t_m - t_o)$$

gdzie α jest współczynnikiem Seebecka.

Należy pamiętać, że podłączenie termopary do woltomierza tworzy dodatkowe, potencjalnie niechciane styki S_3 i S_4 . W efekcie styki te także są termoparami, ale mają one podobny skład i wzajemnie przeciwną polaryzację. Prawo o metalach pośrednich (prawo trzeciego metalu) mówi, że umieszczenie trzeciego metalu pomiędzy dwoma różnymi metalami styku termopary nie będzie miało wpływu na napięcie wyjściowe dopóki dwa styki uformowane przez dodatkowy metal mają identyczną temperaturę. Z tego prawa wynika, że jeśli temperatury styków S_3 i S_4 są takie same, to styki te nie mają wpływu na pomiar. Również prawo trzeciego metalu ma znaczenie przy wykonywaniu spoin ponieważ można wykonać luty i spawy które wprowadzają trzeci metal pomiędzy termoelektrody nie zmieniając SEM gdyż znajdują się w tej samej temperaturze.



Rys. 2 Układ podłączenia termopary w układzie z jedną spoiną.

Innym sposobem połączenia termopary jest układ przedstawiony na rys. 2. W tym układzie również istotna jest znajomość temperatury odniesienia w jakiej znajdują się złącza termopary z przewodami kompensacyjnymi.

W zależności od rodzaju użytych stopów metali uzyskuje się termopary o różnych właściwościach. Termopary można podzielić na trzy grupy w zależności od zakresu pomiarowego:

	Zakres temperatur	Materiały drutów termoparowych
Grupa I	-200 .. +1200°C	brak metali szlachetnych
Grupa II	0 .. +1800°C	platynowo-rodowe
Grupa III	0 .. +2200°C	wolframowo-renowe

Grupa I: w zakresie temperatur od -200°C do +1200°C, w tych termoelementach nie ma metali szlachetnych. W skład tej grupy wchodzi termoelementy:

Typ "K" NiCr-Ni	Stosowany w zakresie temperatur od -200 do +1200°C. Zależność SEM od temperatury dla tego termoelementu jest prawie liniowa, a jego czułość wynosi 41μV/°C.
Typ "J" oraz "L" Fe-CuNi	Ma on mniejsze znaczenie w przemyśle ze względu na ograniczony zakres mierzonych temperatur (od -40°C do +750°C). Ich czułość wynosi 55μV/°C.
Typ "E" NiCr-CuNi	Ze względu na wysoką czułość (68μV/°C), ten typ termoelementu stosowany jest przede wszystkim w zakresie niskich temperatur kriogenicznych od -200 do +900°C. Jest to materiał niemagnetyczny, co może być cenną zaletą w niektórych zastosowaniach specjalnych.
Typ "N" NiCrSi-NiSi	Ten termoelement ma bardzo dobrą stabilność termiczną, porównywalną z termoparami platynowymi. Wykazuje także znakomitą odporność na utlenianie aż do wysokich temperatur. Jest idealnym narzędziem do dokładnych pomiarów temperatury w powietrzu do +1200°C. Czułość wynosi 39μV/°C.
Typ "T" Cu-CuNi	Jest to najrzadziej używany typ termoelementu. Jego zakres pomiarowy wynosi od -200°C do +350°C a czułość 30μV/oC.

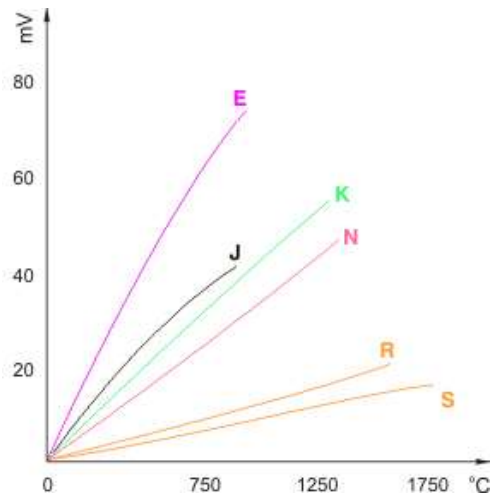
Grupa II: termoelementy w zakresie od 0°C do +1800°C (platynowo-rodowe). W skład tej grupy wchodzi termoelementy:

Typ "S" PtRh10-Pt	Są one używane zazwyczaj w atmosferze silnie utleniającej w zakresie wysokich temperatur do +1600°C. Czułość około 10μV/°C.
Typ "R" PtRh13-Pt	Podobnie jak termoelement „S” używane w atmosferze silnie utleniającej ale posiadają większą czułość - około 14μV/°C.
Typ "B" PtRh30- PtRh6	Umożliwiają pomiar temperatury do +1800°C. Bardzo stabilny termoelement, ale mało czuły zwłaszcza w zakresie niższych temperatur.

Grupa III: termoelementy w zakresie od 0°C do +2200°C (wolframowo-renowe).

Typ "C" Wolfram-Ren / 5% Wolfram	Te termoelementy są używane do pomiaru bardzo wysokich temperatur do +2300°C, w atmosferze redukującej, obojętnej lub w próżni.
Typ "D" Wolfram-Ren / 25% Wolfram	Te termoelementy są używane do pomiaru bardzo wysokich temperatur do +2300°C, w atmosferze redukującej, obojętnej lub w próżni.

Termopary w zależności od typu mają różne współczynniki Seebecka α , których wartości są publikowane w większości notek informacyjnych termopar. Charakterystyki termoelementów są przedmiotem standaryzacji, a wartości siły termoelektrycznej dla poszczególnych materiałów, oraz dopuszczalne odchyłki zawarte są w międzynarodowej normie PN-EN 60584 oraz ITS 90. Na rys 3. Przedstawiono poglądowe charakterystyki termopar różnych typów, a w załączniku 1 zamieszczono fragment tabeli wartości SEM dla termopary typu K zamieszczono w załączniku 1.



Rys. 3 Zestawienie porównawcze charakterystyk termopar różnych typów.

Klasy dokładności

Norma PN-EN 60584 określa wzory obliczania dopuszczalnych błędów pomiarowych.

Typ J (Fe-CuNi)

Klasa	Zakres temperatury	Dopuszczalny błąd
1	-40 °C .. +375 °C	± 1.5 °C
	+375 °C .. +750 °C	± 0.0040 x t
2	-40 °C .. +333 °C	± 2.5 °C
	+333 °C .. +750 °C	± 0.0075 x t

Typ K (NiCr-Ni), Typ N (NiCrSi-NiSi)

Klasa	Zakres temperatury	Dopuszczalny błąd
1	-40 °C .. +375 °C	± 1.5 °C
	+375 °C .. +1000 °C	± 0.0040 x t
2	-40 °C .. +333 °C	± 2.5 °C
	+333 °C .. +1200 °C	± 0.0075 x t

Typ T (Cu-CuNi)

Klasa	Zakres temperatury	Dopuszczalny błąd
1	-40 °C .. +125 °C	± 0.5 °C
	+125 °C .. +350 °C	± 0.0040 x t
2	-40 °C .. +133 °C	± 1.0 °C
	+133 °C .. +350 °C	± 0.0075 x t

Typ E (NiCr-CuNi)

Klasa	Zakres temperatury	Dopuszczalny błąd
1	-40 °C .. +375 °C	± 1.5 °C
	+375 °C .. +800 °C	± 0.0040 x t
2	-40 °C .. +333 °C	± 2.5 °C
	+333 °C .. +900 °C	± 0.0075 x t

Typ S (PtRh10-Pt), Typ R (PtRh13-Pt)

Klasa	Zakres temperatury	Dopuszczalny błąd
1	0 °C .. +1100 °C	± 1.0 °C
	+1100 °C .. +1600 °C	± [1+0.003 (t-1100)]
2	0 °C .. +600 °C	± 1.5 °C
	+600 °C .. +1600 °C	± 0.0025 x t

Typ B (PtRh30-PtRh6)

Klasa	Zakres temperatury	Dopuszczalny błąd
2	+600 °C .. +1700 °C	± 0.0025 x t

W rzeczywistości większość termopar jest skrajnie nieliniowa w zakresie ich temperatury pracy. Aby uzyskać dane o temperaturze konieczne jest przekształcenie nieliniowego napięcia termopary na jednostki temperatury. Proces ten jest nazywany linearyzacją. W użytkowym zakresie temperatur termopary można wyodrębnić fragment proporcjonalnej zależności pomiędzy napięciem termopary a temperaturą.

Termopary odznaczają się dużą dokładnością (co jeszcze nie oznacza dokładności całego urządzenia pomiarowego opartego na termoparze) i elastycznością konstrukcji, co pozwala na ich zastosowanie w różnych warunkach. Wadą jest mechaniczna nietrwałość

złącza pomiarowego i możliwość przepływu prądu poza obwodem termopary, gdy złącze nie jest izolowane. Izolacja złącza eliminuje ten efekt, ale wydłuża czas reakcji termopary na zmianę temperatury. Dlatego w pomiarach o dużej dynamice zmian stosuje się termopary bez osłony. Zwykle w miejscu pomiaru instaluje się obudowę o dużym przewodnictwie cieplnym wewnątrz której znajduje się spoina.

Zalety termopar:

- nie wymagają zewnętrznego zasilania
- niewielkie rozmiary – możliwość lokalnego pomiaru temperatury
- niska pojemność cieplna
- mała bezwładność czasowa
- prostota budowy
- duża niezawodność

Pomimo bardzo prostej konstrukcji, przemysłowe wykonanie **dokładnych** termopar o **powtarzalnych charakterystykach** nie jest zadaniem łatwym. Własności metrologiczne termopary zależą przede wszystkim od **jakości drutów** użytych do wykonania termoelektrod (ich czystości). Istotny jest też dobór przyrządu użytego do pomiaru napięcia termoelektrycznego, gdyż napięcia powstające w termoparach nie przekraczają kilkudziesięciu miliwoltów. W przypadku termopar z metali szlachetnych wartości te są jeszcze mniejsze – kilka miliwoltów.

Termoparę można wykonać samodzielnie, nawet do bardzo zaawansowanych pomiarów. **Wymaga ona jednak cechowania w zakresie temperatur, w jakim ma być użyta. Dokładnie przeprowadzone cechowanie umożliwi korzystanie z termopary w bardzo szerokim zakresie temperatur, nawet jeżeli zależność $U(\Delta T)$ przestaje już być liniowa.** Uszkodzoną termoparę (spoinę) można z powodzeniem naprawić, ponownie tworząc spoinę na końcach przewodów (np. poprzez stopienie spawarką w osłonie gazu obojętnego, np. argonu – metoda TIG).

Materiały wykorzystywane do budowy termoelementów powinny w miarę możliwości posiadać:

- wysoką temperaturę topnienia,
- dużą odporność na czynniki zewnętrzne,
- małą rezystywność,
- wysoką temperaturę pracy ciągłej,
- mały współczynnik cieplny rezystancji,
- niezmienność parametrów w czasie.

Element termopary - dwa druty zbudowane z różnych stopów wytwarzające napięcie, gdy wystawi się je na działanie gradientu temperatury,

Osłona - tuba metalowa lub z innego materiału, zwykle zamknięta z jednego końca, która chroni element termopary przed wpływami środowiska,

Blok wyprowadzeń - zbiór złączy (opcjonalny) ułatwiający podłączanie **termopary** do urządzenia pomiarowego lub przedłużaczy. Fizyczny projekt wyprowadzeń powinien być taki, aby zabezpieczał przed odwrotnym podłączeniem,

Przedłużacze termopary - drut przedłużający, wyprodukowany z takiego samego stopu metali jak element termopary.

Styk odsłonięty - druty termopary są niezabezpieczone. W tym przypadku czujniki mają małą masę termiczną i są wystawiane na bezpośrednie działanie czynników zewnętrznych, co daje najszybszą reakcję na zmiany temperatur,

Styk uziemiony - druty termopary są całkowicie zakryte osłoną i połączone z nią. Styk uziemiony daje średni czas reakcji oraz elektryczne połączenie z osłoną,

Styk nieziemiony - druty termopary są całkowicie zakryte osłoną, ale są od niej elektrycznie odizolowane. Styk nieziemiony daje najwolniejsze reakcje na zmiany temperatury.

Całkowity czas reakcji termopary zależy nie tylko od projektu końcówki, lecz również od średnicy obudowy oraz rodzaju materiału użytego do jej wykonania i od otaczającego środowiska. Czas reakcji może wahać się od dziesiątych części sekundy do kilku sekund.

Kod barwny termopar stosowany w USA				
Typ	Przewodnik (+)	Przewodnik (-)	Koszulka termopary	Koszulka przedłużacza
J	Biały	Czerwony	Brązowy	Czarny
K	Żółty	Czerwony	Brązowy	Żółty
N	Pomarańczowy	Czerwony	Brązowy	Pomarańczowy
T	Niebieski	Czerwony	Brązowy	Niebieski
E	Purpurowy	Czerwony	Brązowy	Purpurowy
R	Czarny	Czerwony	–	Zielony
S	Czarny	Czerwony	–	Zielony
B	Szary	Czerwony	–	Szary

Kalibracja Podstawy

Kalibrację czujników temperatury wykonuje się wówczas, gdy na podstawie norm lub wymogów prawnych konieczne jest zapewnienie zgodności z przepisami międzynarodowymi. Normy jakościowe i normy bezpieczeństwa zgodne z DIN EN ISO 9000 wymagają, by wszystkie środki miernicze i kontrolne konieczne dla zapewnienia odpowiedniej jakości poddawane były kalibracji pod kątem spełnienia norm krajowych i międzynarodowych opartych na jednostkach SI. Ponadto, kalibracja może być konieczna w sytuacjach, gdy wymagane jest zapewnienie mniejszej tolerancji (większej dokładności pomiarowej) niż ta wymagana na mocy normy DIN EN 60751, lub też w celu kontroli długoterminowego działania czujnika temperatury.

Kalibracja oznacza, że konieczne jest ustalenie poziomu odchyleń pomiarowych na całym czujniku temperatury lub łańcuchu pomiarowym (czujnik i przetwornik). W czasie kalibracji nie dokonuje się żadnej zmiany badanego materiału. W urządzeniach pomiarowych w czasie dokonywania pomiaru ustalana jest różnica pomiędzy temperaturą wskazywaną przez urządzenie pomiarowe a wartością referencyjną. Nie dokonuje się żadnych zmian w samym urządzeniu pomiarowym, np. przestawienie punktu uznawanego za punkt zerowy.

Kalibracja czujników temperatury odbywa się na dwa sposoby: kalibracja w stałych punktach pomiarowych oraz kalibracja według metody porównawczej.

Kalibracja w stałych punktach pomiarowych

Kalibracja w stałych punktach pomiarowych stosowana jest przede wszystkim w normalnych termometrach oporowych typu Pt zgodnych z ITS 90 (Międzynarodowa skala temperatury z 1990 r.).

Stałe punkty pomiarowe to punkty fazowe najczystszych substancji (punkt krystalizacji, topnienia i punkt potrójny).

Pomiar temperatury w stałych punktach pomiarowych odbywa się w cieczy lub w pionowym piecu wielostrefowym. Temperatura w stałych punktach pomiarowych może być mierzona z wykorzystaniem otwartego lub zamkniętego zbiornika szklanego, zawierającego odpowiedni materiał (wodę lub metal) w najczystszej formie >99,9999%.

Kalibracja w stałych punktach pomiarowych odbywa się w temperaturach od 0,01°C (punkt potrójny wody) a 921°C z dokładnością od 0,5mK do 5mK. Kalibracja w stałych punktach pomiarowych wiąże się z dużymi nakładami czasowymi i sprzętowymi, dlatego też tego rodzaju kalibrację przeprowadza się w państwowych punktach referencyjnych i kilku laboratoriach kalibracyjnych DKD .

Kalibracja według metody porównawczej

Większość czujników temperatury stosowanych w przemyśle poddawana jest kalibracji według metody porównawczej.

W porównaniu z kalibracją w stałych punktach pomiarowych, kalibracja według metody porównawczej jest znacznie prostsza w realizacji.

W czasie kalibracji badane materiały umieszczane są w cieczy lub w piecu kontrolnym wraz z jednym lub dwoma zwykłymi termometrami.

Ciecze wykorzystywane do kalibracji obejmują następujące substancje:

Etanol od -100°C do 0°C

Woda 0°C do 99°C

Olej silikonowy 50°C do 250°C

Mieszanki soli 180°C do 630°C

Cyna 250°C do 630°C

Pomiary porównawcze w piecu kontrolnym można wykonywać do temperatury 1600°C.

Badane materiały oraz termometry referencyjne umieszczane są w strefie o jednolitej i stałej temperaturze.

Badane materiały umieszczane są w instalacji kontrolnej w taki sposób, aby wyeliminować jakąkolwiek możliwość błędu wynikającego z rozproszenia ciepła.

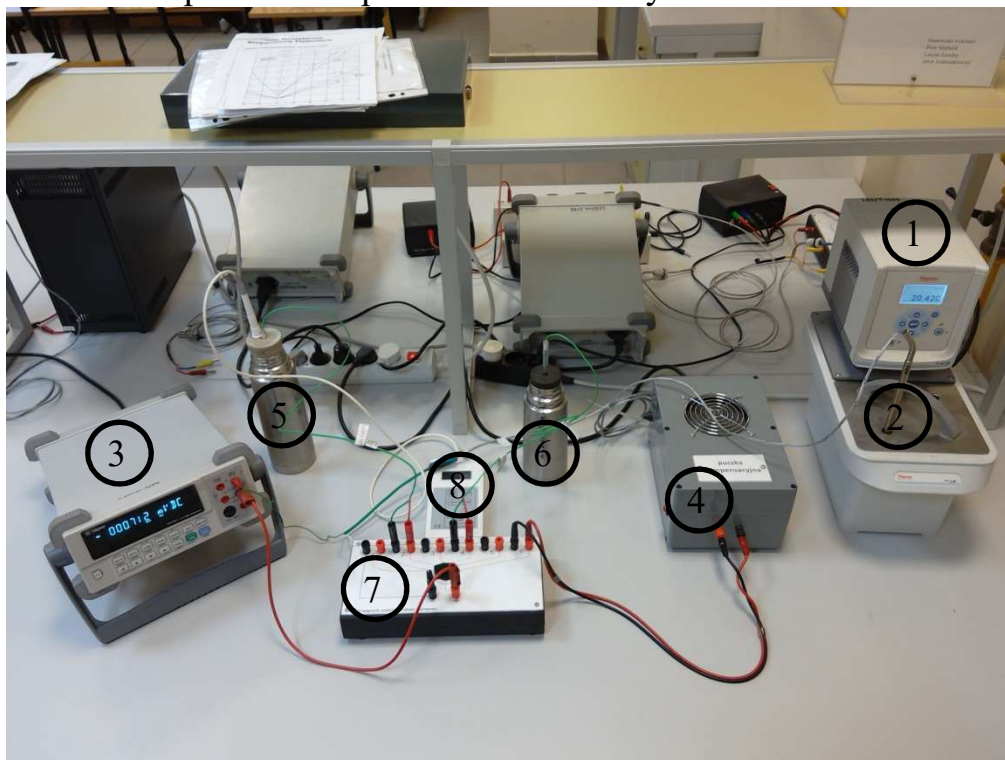
Przed dokonaniem kalibracji, badane materiały badane są pod kątem funkcjonalnym i izolacyjnym zgodnie z normą DIN EN 60751.

Referencyjnymi urządzeniami pomiarowymi są termometry oporowe typu Pt lub termopary, które zostały skalibrowane w państwowym punkcie kontrolnym lub w laboratorium DKD.

Po stabilizacji cieczy lub pieca kontrolnego badane materiały poddawane są pomiarowi z porównaniem z termometrami referencyjnymi. Wyniki kalibracji potwierdzone są odpowiednim certyfikatem kalibracji.

Stanowisko pomiarowe

Stanowisko pomiarowe przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Stanowisko pomiarowe

W skład stanowiska pomiarowego wchodzi następujące elementy i urządzenia:

1. Ultratermostat
2. Badana termopara w osłonie metalowej
3. Miliwoltomierz
4. Puszka kompensacyjna
5. Termos zawierający wodę z lodem
6. Termos z powietrzem jako temperatura otoczenia
7. Przełącznik elektryczny
8. Termometr elektroniczny do kontroli temperatury mieszaniny wody z lodem

Przebieg ćwiczenia

1. Zmierzyć temperaturę otoczenia.
2. Sprawdzić czy temperatura w termosie oznaczonym jako „Lód” wynosi 0°C ,
3. Włączyć ultratermostat (1) i nastawić temperaturę 30°C . Uruchomić obieg wodny.

Uwaga: Wszystkich odczytów należy dokonać każdorazowo po ustaleniu się temperatury w ultratermostacie i gdy miliwoltomierz będzie pokazywał stabilne wskazanie dla nastawy przełącznika (7) na „lód”.

4. Wykonać **po 10** odczytów napięcia SEM, zmierzonego miliwoltomierzem (3) dla następujących zmiennych:

a) dla temperatur ultratermostatu (1) (t_{wz}): 30°C, 40°C, 50°C, 55°C, 60°C, 65°C, 70°C, 75°C, 80°C, 85°C, 90°C.

b) dla każdej temperatury termostatu zmieniać ustawienie przełącznika zimnych końców (7) na:

- lód (t_{no})

- powietrze (t_o)

- puszkę kompensacyjną (t_{komp})

Wyniki pomiarów zebrać w tabeli pomiarowej wg wzoru zamieszczonego w załączniku.

Sprawozdanie:

Sporządzić na jednym wykresie charakterystyki $E(t)$ termopary dla 3 przypadków temperatury spiny odniesienia: lodu, powietrza i puszki kompensacyjnej.

Na tym samym wykresie narysować charakterystykę termopary wg danych zaczerpniętych z normy (załącznik 1).

Sporządzić wykres błędu pomiaru temperatury w funkcji temperatury dla przypadków temperatury spiny odniesienia: lodu, powietrza i puszki kompensacyjnej.

Określić niepewność pomiaru napięcia.

Wnioski

Załącznik 1

Charakterystyka termometryczna termopar typu K (NiCr-Ni). Siła elektromotoryczna e_{mf} [mV] w funkcji temperatury. Norma PN-EN 60584-1 ($T_0 = 0$).

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.000	0.075	0.114	0.154	0.193	0.233	0.273	0.313	0.352	0.392	0.432
10	0.432	0.472	0.512	0.552	0.592	0.632	0.672	0.713	0.753	0.793	0.833
20	0.833	0.874	0.914	0.954	0.995	1.035	1.076	1.117	1.157	1.198	1.238
30	1.238	1.279	1.320	1.361	1.402	1.442	1.483	1.524	1.565	1.606	1.647
40	1.647	1.688	1.729	1.770	1.811	1.852	1.893	1.935	1.976	2.017	2.058
50	2.058	2.100	2.141	2.182	2.223	2.265	2.306	2.347	2.389	2.430	2.472
60	2.472	2.513	2.555	2.596	2.637	2.679	2.720	2.762	2.803	2.845	2.886
70	2.886	2.928	2.970	3.011	3.053	3.094	3.136	3.177	3.219	3.260	3.302
80	3.302	3.343	3.385	3.426	3.468	3.510	3.551	3.593	3.634	3.676	3.717
90	3.717	3.759	3.800	3.842	3.883	3.924	3.966	4.007	4.049	4.090	4.131
100	4.131	4.173	4.214	4.255	4.297	4.338	4.379	4.421	4.462	4.503	4.544

Ćwiczenie nr 1

Miernictwo i systemy pomiarowe

Protokół pomiarowy z dnia

Temperatura otoczenia:°C , badana termopara: typ K,

t_{wz}	lód					powietrze					p. komp.				
	$t_{no}=0^{\circ}C$					t_o					t_{komp}				
°C	mV					mV					mV				
30															
40															
50															
55															
60															
65															
70															

75															
80															
85															
90															

Wykonawcy:

1.
2.
3.
4.
5.
6.

Uwagi:

7.
8.
9.
10.
11.
12.