

Ćwiczenie nr 3

Temat: POMIAR TEMPERATURY PIROMETRAMI

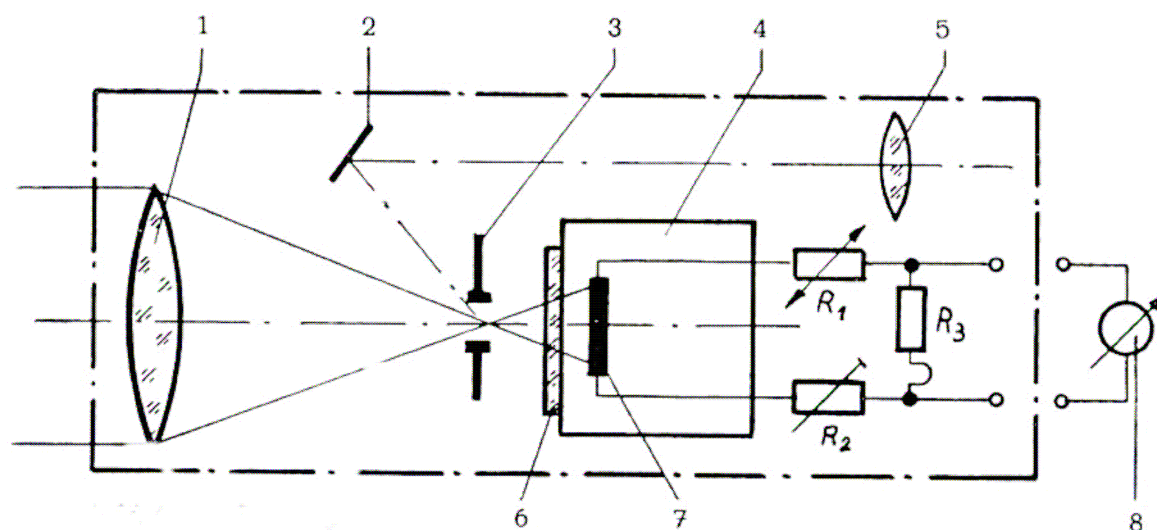
1. Wiadomości podstawowe

Pirometr jest bezstykowym optycznym urządzeniem odbierającym promieniowanie ciepłe (radiacyjne) obiektu i służące do pomiaru temperatury powierzchni tego obiektu. Tym samym jest to pewien rodzaj termometru, a dokładniej termometru radiacyjnego.

Pirometr składa się z:

- systemu optycznego,
- detektora
- układu pomiarowego z wyświetlaczem.

Zadaniem systemu optycznego jest skupić promieniowanie emitowane z badanej powierzchni na detektorze. Zadaniem detektora jest przetworzyć padające promieniowanie na elektryczny (np. na napięcie) sygnał użyteczny. Układ pomiarowy przetwarza sygnał elektryczny na wskazania wielkości mierzonej.



Rys.1 Schemat budowy typowego pirometru

Główną zaletą pirometrów jest możliwość pomiaru zdalnego. Kontakt z powierzchnią nie jest wymagany, badane jest tylko promieniowanie wysyłane przez powierzchnię, której temperaturę należy zmierzyć. Stąd pirometrami mierzy się temperaturę powierzchni trudno dostępnych, będących w ruchu, agresywnych chemicznie, odległych lub powierzchni o najwyższych temperaturach. Dodatkową zaletą jest też nie zakłócanie istniejącego pola temperatury oraz szeroki zakres i możliwość pomiaru najwyższych temperatur. Natomiast główne wady pirometrów to: zależność wyniku pomiarów od emisyjności i kierunkowości promieniowania powierzchni, duża czułość na zakłócenia (promieniowanie postronne, pochłanianie promieniowania), cena urządzenia.

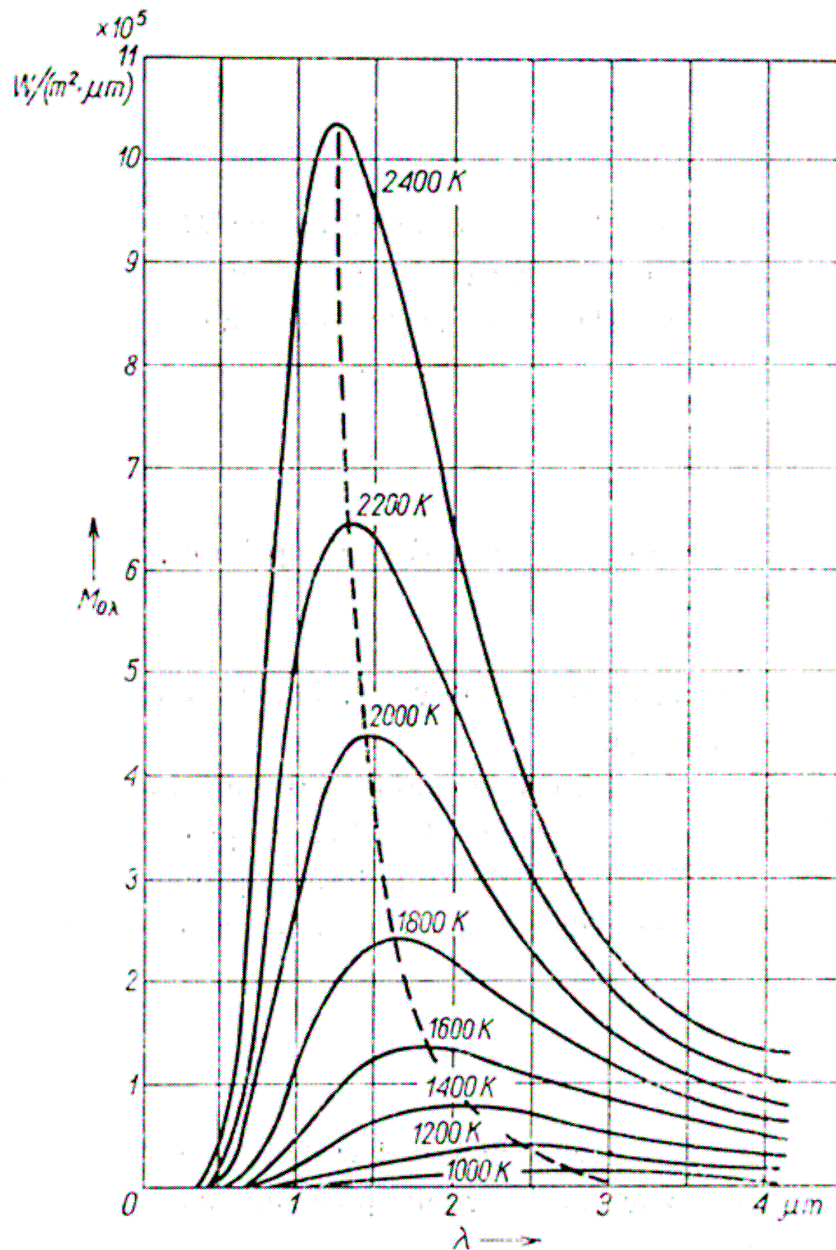
Emisję promieniowania z powierzchni o temperaturze T (mierzonej w K) określa prawo Stefana-Boltzmana, które dla ciała doskonale czarnego ($\varepsilon=1$) ma postać:



$$P_{cc} = \sigma S T^4$$

gdzie S to pole promieniującej powierzchni, a σ - stała Boltzmana równa $5.670 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

Widmowy (zależny od długości fali λ) rozkład gęstości monochromatycznej mocy promienistej (emitancji) powierzchni ciała doskonale czarnego o temperaturze T przedstawia rys.2.



Rys.2 Zależność monochromatycznej emitancji energetycznej m_{cc} ciała czarnego od długości fali λ wg Plancka.

Przyjmując za kryterium zakres wykorzystywanego przez pirometr widma promieniowania można wyróżnić następujące typy pirometrów:

- pirometry całkowitego promieniowania (radiacyjne): detektor jest czuły na bardzo szeroki zakres promieniowania – reaguje na sygnał będący sumą promieniowania o różnych długościach fal (teoretycznie od 0 do ∞). Matematycznie odpowiada to całemu polu powierzchni pod jedną z krzywych na rys.2,
- pirometry pasmowe: detektor reaguje na promieniowanie z wybranego zakresu (pasma) $\lambda_1 - \lambda_2$. Odpowiada to polu powierzchni pod jedną z krzywych na rys.2, ale tylko z zakresu $\lambda_1 - \lambda_2$,
- pirometry barwowe (chomatyczne):
 - jednobarwowe (monochromatyczne)
 - dwubarwowe (bichromatyczne)
 - trójbarwowe (trichromatyczne) i wielobarwowe

w których, detektor jest czuły na jedną (dwie lub trzy lub więcej), określoną długość fali λ_{ust} . Sygnałem mierzonym jest wartość $m(\lambda_{ust1})$ (lub np. $m(\lambda_{ust1})$ i $m(\lambda_{ust2})$). Stosunek sygnałów $m(\lambda_{ust1})$ pozwala określić temperaturę powierzchni. Matematycznie odpowiada to np. stosunkowi $m(\lambda_1)/m(\lambda_2)$, który można przeliczyć na temperaturę powierzchni T.

Poszczególne typy pirometrów charakteryzują się następującymi właściwościami:

Pirometry całkowitego promieniowania: proste urządzenia, czułe w zakresie od 0.3 μm do 2.5 – 20 μm . Zakres czułości określa jakość układu optycznego (zwykle szkło przepuszcza promieniowanie do 2.5 μm , szkło kwarcowe do 4 μm , kryształy fluorku potasu do 10 μm , siarczek cynku w zakresie 8-14 μm). Wskazania zależą od emisyjności promieniującej powierzchni, skalowane są zwykle dla jednej lub kilku wartości ϵ . Błąd wynikający z niepoprawnego wyboru wartości emisyjności promieniującej powierzchni korygować należy worem:

$$T \approx T_m \sqrt[4]{\frac{\epsilon_w}{\epsilon}} \quad (1)$$

gdzie T_m to temperatura wskazywana przez przyrząd, ϵ_w emisyjność dla której pirometr był wzorcowany (zwykle $\epsilon_w=1$), a T rzeczywista temperatura powierzchni. Typowe zakresy pomiarowe takich pirometrów to 100-600°C i 600-2000°C, przy dokładności wskazań 0,5-2% skali pomiarowej. Zanieczyszczenia układu optycznego, dym, mgła, para wodna, pyły znacząco pogarszają dokładność pomiaru.

Pirometry pasmowe: Filtry ograniczają promieniowanie padające na detektor do fal z określonego wąskiego zakresu $\Delta\lambda$. Odpowiedni dobór zakresu pozwala na wyeliminowanie zakłóceń powodowanych np. parą wodną lub dwutlenkiem węgla. Wzór określający poprawną wartość mierzonej temperatury ma postać:

$$T \approx T_m \sqrt[n]{\frac{\epsilon_w}{\epsilon_{\Delta\lambda}}} \quad (2)$$

gdzie $n=(5-12)$ to współczynnik zależny w zależności od typu pirometru. Typowe zakresy mierzonej temperatury to (-32-4000)°C, przy zakresach czułości $\Delta\lambda$ 8-14 μm (dla zakłóceń atmosferycznych), ok. 5 μm (dla powierzchni szkła), 3.86 (przy pomiarze w obecności płomienia i spalin silnikowych). Uzyskiwane dokładności wskazań to 0.25-2% skali pomiarowej.

określoną długość fali uzyskuje się bądź przez układ filtrów wyodrębnia z widma porządaną długości fal, bądź stosując detektor czuły tylko na bardzo wąski zakres widma (0.1-0.2 μm).

Mierzone długości fal to najczęściej tzw. efektywne długości fal (0.65, 1, 1.5, 1.55, 1.6, 2.5, 2.8, 4 μm).

Pirometry dwubarwowe: Są przyrządami najpopularniejszymi spośród pirometrów barwowych. Wyznaczana jest w nich wartość monochromatycznej gęstości emitancji $m(\lambda)$ dla dwóch różnych długości fal, a następnie stosunek $m(\lambda_1) / m(\lambda_2)$ przeliczany jest na temperaturę mierzonej powierzchni.

Funkcja określająca poprawną wartość mierzonej temperatury ma w tym przypadku postać:

$$T = f(T_m, \lambda_1, \lambda_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2) \quad (3) \text{ która dla układów w}$$

których emisyjność mierzonej powierzchni nie zależy od długości fali ($\varepsilon_1(T) = \varepsilon_2(T) = \varepsilon(T)$ – tzw. ciało szare) przekształca się w prostą zależność:

$$T = T_m \quad (4)$$

Tak więc podstawową zaletą pirometrów dwubarwnych jest to, że dokładność ich wskazań nie zależy od zmian emisyjności (jeśli są takie same dla każdej długości fali), kierunkowości promieniowania, od zakłóceń atmosferycznych, ograniczeń wielkości powierzchni.

Typowe zakresy mierzonej temperatury to (900-3000) $^{\circ}\text{C}$ lub (50-3700) $^{\circ}\text{C}$, przy dokładnościach 0.5-2% zakresu pomiarowego.

Pirometry wielobarwowe: pozwalają na dokładną analizę temperatury powierzchni przy braku wstępnej informacji o emisyjności tej powierzchni. W skład tego typu mierników wchodzi układ podziału wiązki padającego promieniowania na sygnały odpowiadające mierzonym zakresom $\Delta\lambda$, układ równoległe działających detektorów dla pomiaru tych sygnałów oraz układ obliczeniowy którego zadaniem jest wyznaczyć mierzona temperaturę.

Pirometry optyczne to podgrupa pirometrów jednobarwowych. Działanie ich polega na porównaniu przez obserwatora promieniowania (dokładniej jaskrawości) powierzchni obiektu z promieniowaniem (jaskrawością) wzorcowym. Długość fali dla której przeprowadzane jest porównanie leży w zakresie promieniowania widzialnego lub w bliskiej podczerwieni. Typowa wartość to $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$. Typowe zakresy mierzonej temperatury to (900-3000) $^{\circ}\text{C}$, przy dokładnościach 1-2% zakresu pomiarowego.

Spotyka się także pirometry tego typu (działanie polegające na porównaniu przez obserwatora jaskrawości obiektu i wzorca) wykorzystujące cały zakres promieniowania widzialnego. Jest to podgrupa pirometrów całkowitego promieniowania.

Ważnym czynnikiem zapewniającym poprawność pomiarów jest takie zbudowanie układu pomiarowego, aby pole widzenia pirometru (powierzchnia z której promieniowanie jest uwzględniane) było jednolite. Sprowadza się to zwykle do wyznaczenia właściwej odległości pirometru od mierzonej powierzchni i porównaniu wymiarów mierzonej powierzchni z polem widzenia pirometru.

Wartość współczynnika n , niezbędnego do wyznaczenia rzeczywistej mierzonej temperatury powierzchni (wzór (2)) można wyznaczyć przekształcając:

$$T_r = T_p \sqrt[n]{\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{RZ}}}, \quad (5)$$

gdzie:

T_r – temperatura mierzona sondą,



T_p - temperatura mierzona pirometrem,
 ϵ_{rz} – emisyjność rzeczywista,
 ϵ_p – emisyjność wzorcowania (nastawy) pirometru.

Przyjmując, że temperatura rzeczywista jest równa temperaturze mierzonej sondą termoelektryczną, dla dwóch kolejnych pomiarów temperatury powierzchni o stałej temperaturze pirometrem o różnych nastawach ϵ otrzymamy zależność:

$$T_{p1} \sqrt[n]{\frac{\epsilon_{p1}}{\epsilon_{RZ}}} = T_{p2} \sqrt[n]{\frac{\epsilon_{p2}}{\epsilon_{RZ}}}. \quad (6)$$

Po przekształceniach, przyjmując że ϵ_{RZ} jest stała, otrzymujemy następujące równania:

$$T_{p1} \sqrt[n]{\epsilon_{p1}} = T_{p2} \sqrt[n]{\epsilon_{p2}} \quad (7)$$

$$\frac{T_{p1}}{T_{p2}} = \sqrt[n]{\frac{\epsilon_{p2}}{\epsilon_{p1}}} \quad (8)$$

$$\frac{T_{p1}}{T_{p2}} = \left(\frac{\epsilon_{p2}}{\epsilon_{p1}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

$$\ln \left(\frac{T_{p1}}{T_{p2}} \right) = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{\epsilon_{p2}}{\epsilon_{p1}} \right) \quad (10)$$

Końcowo n można wyznaczyć z zależności:

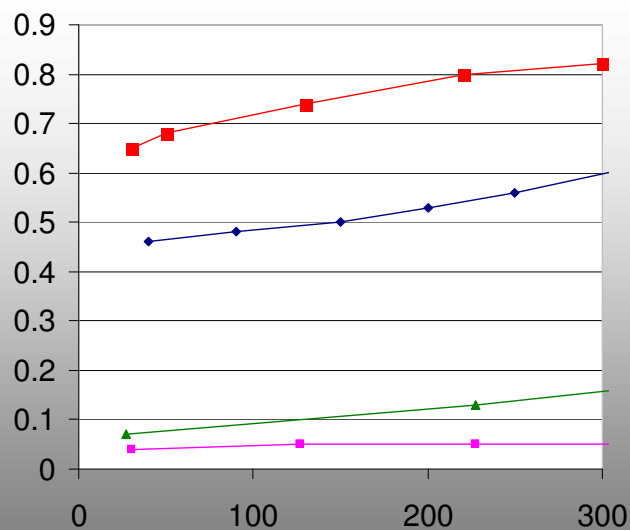
$$n = \frac{\ln \left(\frac{\epsilon_{p2}}{\epsilon_{p1}} \right)}{\ln \left(\frac{T_{p1}}{T_{p2}} \right)} \quad (11),$$

gdzie ϵ_{p1} , ϵ_{p2} to wartości emisyjności, a T_{p1} , T_{p2} to wartości temperatur z dwóch kolejnych pomiarów.

Rzeczywiste wartości emisyjności metali są zależne od temperatury. Dla czterech materiałów: mosiądzu, stali polerowanej, stalinie polerowanej oraz miedzi niepolerowanej przedstawia to poniższy wykres.



Emisyjność w funkcji temperatury



—◆— Mosiądz —■— Stal niepolerowana —▲— Stal polerowana —■— Miedź niepolerowana

2. Charakterystyki badanych pirometrów

2.1 Pirometr PT 3LF

Podstawowe dane:

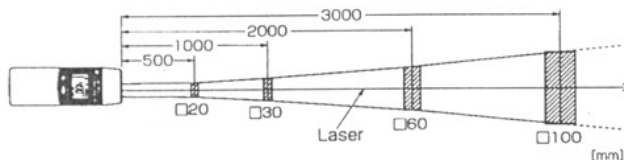
zakres: $-20 + 400^{\circ}\text{C}$

emisyjność: nastawiana
 0.95 lub 0.70

pasmo pomiarowe: 8-14 μm

czas pomiaru: 1s

PT-3LF



Rys.3 Charakterystyka geometrii układu optycznego pirometru PT-3LF

2.2 Pirometr IR Miniray100

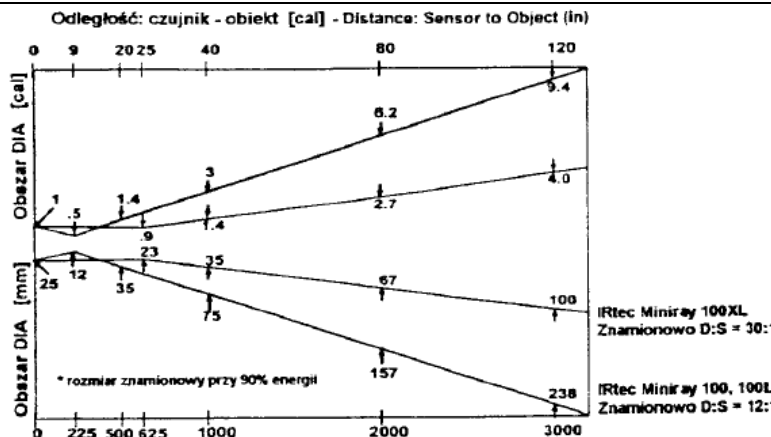
Podstawowe dane:

zakres: $-23 + 520^{\circ}\text{C}$

emisyjność: nastawiana od
 0.30 do 1.00 co 0.01

pasmo pomiarowe: 8-14 μm

czas pomiaru: 0,5s



Rys.4 Charakterystyka geometrii układu optycznego pirometru Miniray 100

2.3 Pirometr GSP 1871

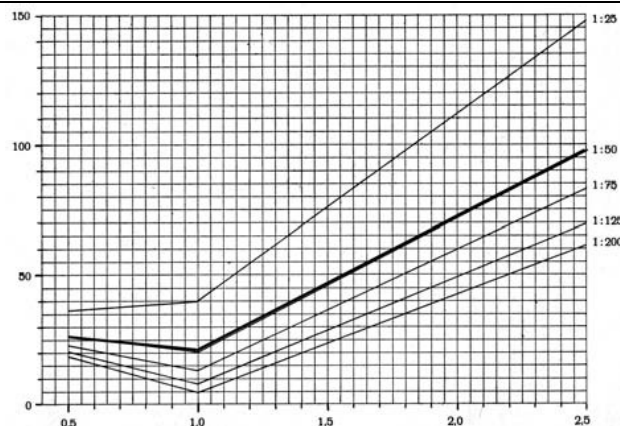
Podstawowe dane:

zakres: $600 + 1200^{\circ}\text{C}$

emisyjność: 1.00

pasmo: 0.3-2.7 μm

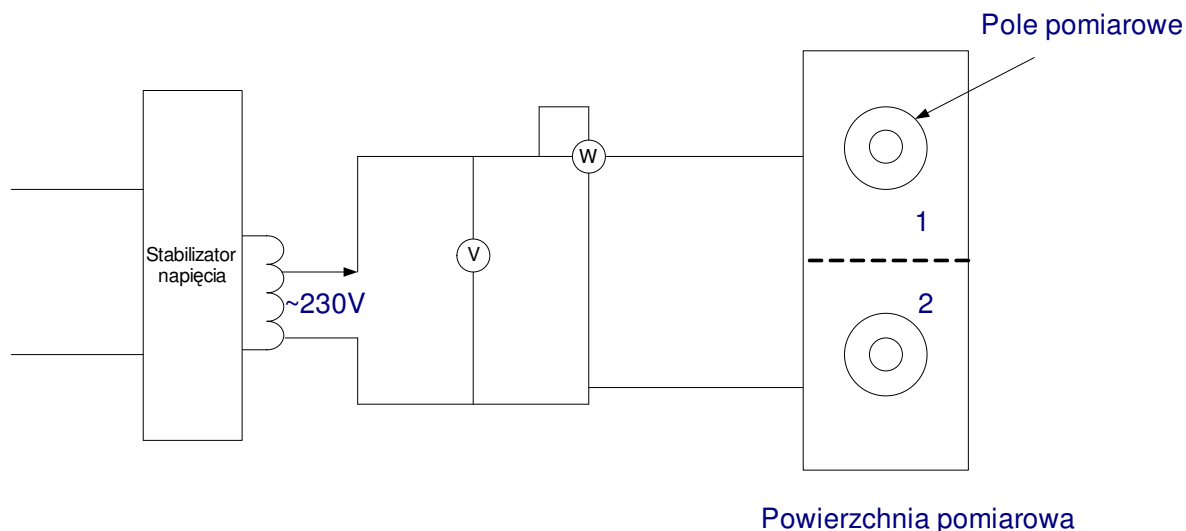
czas pomiaru: 0,2s



Rys.5 Charakterystyka geometrii układu optycznego pirometru GSP 1871

3. Przebieg ćwiczenia

Zadanie 1. Za pomocą pirometru Miniray 100 oraz sondy pomiarowej umieszczonej na powierzchni pomiarowej, dokonać pomiaru temperatur płytek: mosiężnej, stalowej polerowanej, stalowej niepolerowanej oraz miedzianej niepolerowanej. Stanowisko pomiarowe zestawić wg poniższego schematu:



Rys. 2 Schemat pomiarowy

Zad 1.1. Wyznaczanie współczynnika „n” pirometru MiniRay 100

Pomiary temperatury T_p wykonać sondą i pirometrem IR Miniray, dla trzech wartości napięć zasilania, które należy dobrać w taki sposób, aby moc wskazywana przez watomierz wynosiła odpowiednio: $P=60$ [W], $P=90$ [W], $P=120$ [W]. Wyniki pomiarów zestawić w tabeli 1.

Dla wszystkich uzyskanych pomiarów należy obliczyć współczynnik „n”, korzystając ze wzoru (11), a następnie wyniki wprowadzić do tabeli 2.

Następnie obliczyć średnią wartość współczynnika „n” dla wszystkich pomiarów. Wartość tą przyjąć do dalszych obliczeń wykonywanych w zad. 1.2.

Zad 1.2. Obliczyć rzeczywistą wartość temperatury powierzchni korzystając z wyliczeń uzyskanych z pomiarów pirometrem. Wyniki zamieścić w tabeli 3.

$$T_R = T_P n \sqrt{\frac{\epsilon_P}{\epsilon_{RZ}}} \quad (12)$$

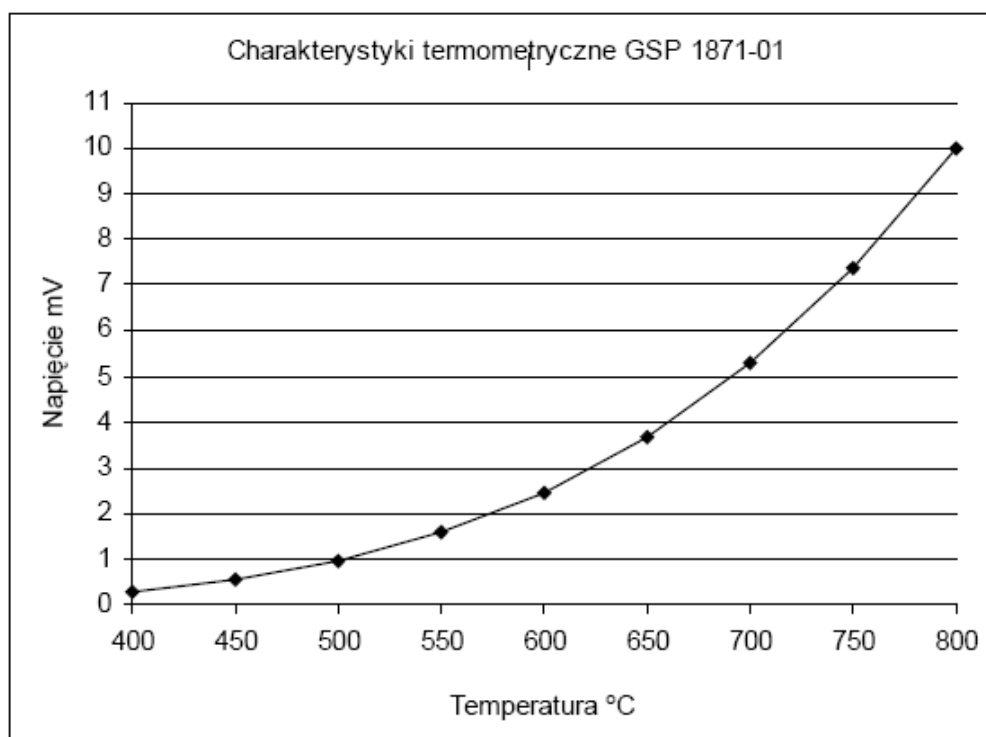
Zadanie 2: Dokonać analogicznych pomiarów temperatury powierzchni przy pomocy pirometru PT-3LF, bez wyznaczania wartości współczynnika n . Wyniki umieścić w tabeli 4.

Zadanie 3: Pomiar temperatury pieca.

Zmienić odczep transformatora zasilającego piec silitowy na poz. III, a nastawę temperatury na 700°C . Zmierzyć trzykrotnie temperaturę ściany wnętrza pieca pirometrem GSP 1871, przy optymalnym usytuowaniu pirometru. Obliczyć rzeczywistą temperaturę przyjmując emisyjność ściany pieca $\varepsilon = 0.8$ korzystając ze wzoru (12).

Tabela 5

Przyrząd Pyrometer GSP 1871	Napięcie [mV]	Temp [$^{\circ}\text{C}$]	Napięcie [mV]	Temp [$^{\circ}\text{C}$]	Napięcie [mV]	Temp [$^{\circ}\text{C}$]
pomiar						
obliczenia	-		-		-	



Rys. 3 Charakterystyki pirometru GSP 1871-01

4. Literatura

1. Augustyniak W., Burakowski T., Giziński J: Termometria przemysłowa w obróbce cieplnej metali, IMP, Warszawa, 1989
2. Michalski L., Eckersdorf K.: Pomiary temperatury, WNT, Warszawa, 1986 wyd. III.

Tab.1 Wyniki pomiaru temperatury T_p [°C] Sonda termometryczna typu K (NiCr-Ni) i pirometr MiniRay

Nr pomiaru		P=60 [W]				P=90 [W]				P=120 [W]			
		T_p [°C]				T_p [°C]				T_p [°C]			
		Mosiądz	Stal poler.	Stal niepoler.	Miedź niepoler.	Mosiądz	Stal poler.	Stal niepoler.	Miedź niepoler.	Mosiądz	Stal poler.	Stal niepoler.	Miedź niepoler.
0	sonda												
1	$\varepsilon = 0,3$												
2	$\varepsilon = 0,4$												
3	$\varepsilon = 0,5$												
4	$\varepsilon = 0,6$												
5	$\varepsilon = 0,7$												
6	$\varepsilon = 0,8$												
7	$\varepsilon = 0,9$												
8	$\varepsilon = 1$												

Tab. 2. Wyniki obliczania wartości współczynnika „n” dla pirometru Miniray

Nr pomiaru	P=60[W]				P=90[W]				P=120[W]			
	Mosiądz	Stal poler.	Stal niepoler.	Miedź niepoler.	Mosiądz	Stal poler.	Stal niepoler.	Miedź niepoler.	Mosiądz	Stal poler.	Stal niepoler.	Miedź niepoler.
	wartość współczynnika „n”				wartość współczynnika „n”				wartość współczynnika „n”			
1-2												
3-4												
5-6												
7-8												

Tab. 3. Wyniki pomiaru temperatury rzeczywistej T_{RZ} [°C] pirometrem MiniRay

Nr pomiaru		P=60 [W]				P=90 [W]				P=120 [W]			
		T_R [°C]				T_R [°C]				T_R [°C]			
		Mosiądz	Stal poler.	Stal niepoler.	Miedź niepoler.	Mosiądz	Stal poler.	Stal niepoler.	Miedź niepoler.	Mosiądz	Stal poler.	Stal niepoler.	Miedź niepoler.
1	$\varepsilon = 0,3$												
2	$\varepsilon = 0,4$												
3	$\varepsilon = 0,5$												
4	$\varepsilon = 0,6$												
5	$\varepsilon = 0,7$												
6	$\varepsilon = 0,8$												
7	$\varepsilon = 0,9$												
8	$\varepsilon = 1$												
	średnia												

Tab. 4. Wyniki pomiaru temperatury rzeczywistej T_{RZ} [°C] pirometrem PT-3LF

Nr pomiaru		P=60 [W]				P=90 [W]				P=120 [W]			
		T_R [°C]				T_R [°C]				T_R [°C]			
		Mosiądz	Stal poler.	Stal niepoler.	Miedź niepoler.	Mosiądz	Stal poler.	Stal niepoler.	Miedź niepoler.	Mosiądz	Stal poler.	Stal niepoler.	Miedź niepoler.
1	$\varepsilon = 0,7$												
2	$\varepsilon = 0,95$												