

ĆWICZENIE NR 9 PIROMETRIA I TERMOWIZJA

(opracował Eligiusz Pawłowski)

Cel i zakres ćwiczenia

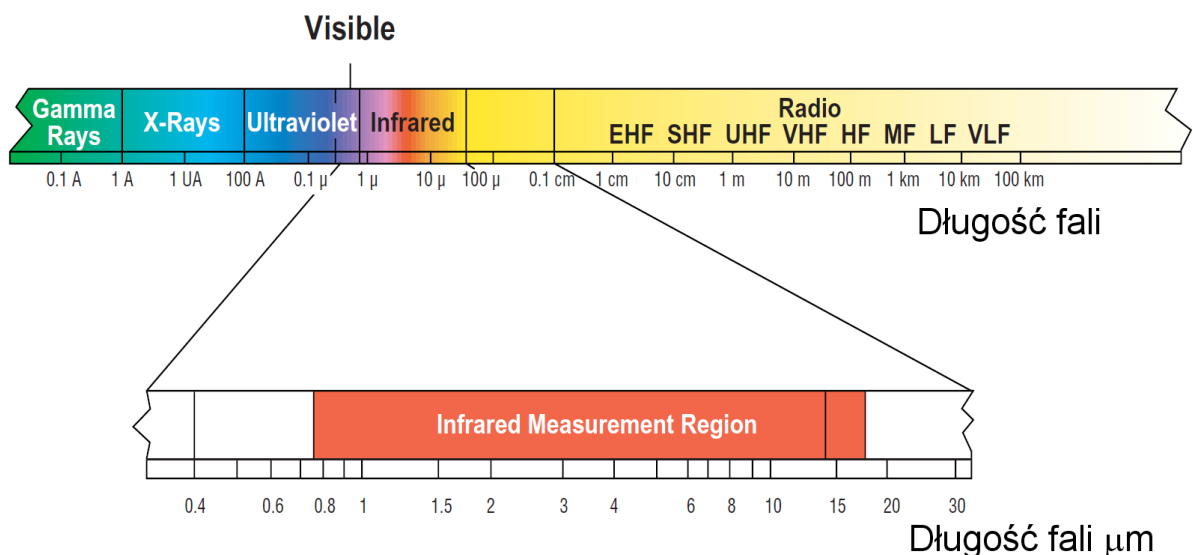
Celem ćwiczenia jest praktyczne zapoznanie z bezstykowymi pomiarami temperatury za pomocą pirometru i kamery termowizyjnej. Zakres ćwiczenia obejmuje wyznaczenie wybranych parametrów przyrządów oraz szacowanie współczynników emisyjności.

1. WSTĘP

Każde ciało o temperaturze powyżej zera bezwzględnego emituje promieniowanie elektromagnetyczne, zwane promieniowaniem cieplnym. Promieniowanie ciepłe ma ciągły zakres długości fali, jednak dla spotykanych w praktyce temperatur, maksimum energii tego promieniowania przypada na przedział długości fali zwany promieniowaniem podczerwonym. Zależnie od długości fali λ wyróżnia się następujące rodzaje promieniowania:

	$\lambda < 10^{-5} \mu\text{m}$	- promieniowanie kosmiczne (gamma)
$10^{-5} \mu\text{m} < \lambda < 10^{-2} \mu\text{m}$		- promieniowanie X (Roentgena)
$10^{-2} \mu\text{m} < \lambda < 0,35 \mu\text{m}$		- promieniowanie ultrafioletowe (UV)
$0,35 \mu\text{m} < \lambda < 0,75 \mu\text{m}$		- promieniowanie widzialne
$0,75 \mu\text{m} < \lambda < 10^3 \mu\text{m}$		- promieniowanie podczerwone (IR)
$10^3 \mu\text{m} < \lambda$		- promieniowanie radiowe

Na rys.1 przedstawiono zakresy poszczególnych rodzajów promieniowania z wyróżnionym zakresem promieniowania podczerwonego wykorzystywanym w pomiarach.



Zakres pomiarowy promieniowania podczerwonego

Rys.1. Zakresy długości fal dla różnych rodzajów promieniowania

W całym zakresie promieniowania podczerwonego od $0,75 \mu\text{m}$ do 1 mm zazwyczaj wyróżnia się dodatkowo następujące podzakresy wykorzystywane w pomiarach temperatury:

$$0,75 \mu\text{m} < \lambda < 3 \mu\text{m} - \text{bliska podczerwień}$$

$$3 \mu\text{m} < \lambda < 6 \mu\text{m} - \text{średnia podczerwień}$$

$$6 \mu\text{m} < \lambda < 15 \mu\text{m} - \text{daleka podczerwień}$$

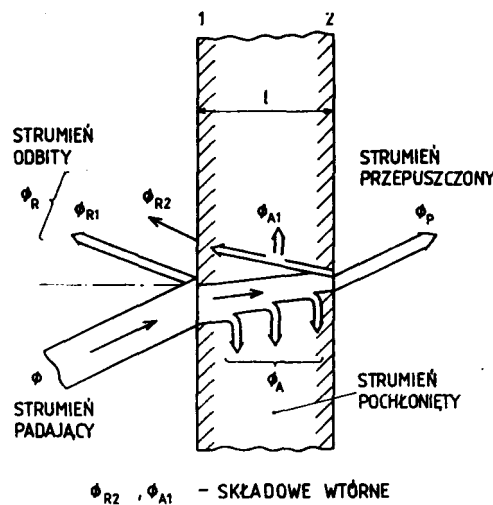
Wykorzystując znane prawa rządzące zjawiskami promieniowania cieplnego budowane są urządzenia umożliwiające bezstykowy (na odległość) pomiar temperatury, zwane pirometrami. Pirometr jest przyrządem pomiarowym służącym do bezdotykowego pomiaru temperatury powierzchni ciała. Działa w oparciu o analizę promieniowania cieplnego emitowanego przez badane ciało. Charakterystyczną cechą pirometru i jego podstawową zaletą jest brak zakłócającego wpływu na temperaturę badanego obiektu.

Termografia jest to proces obrazowania pola temperatury na powierzchni ciała w paśmie podczerwieni (najczęściej w średniej i dalekiej podczerwieni od ok. 2 do $14 \mu\text{m}$).

1.1. Ciało doskonale czarne

W ciele fizycznym, do którego dociera promieniowanie, zachodzą trzy zjawiska:

1. absorpcja – pochłanianie energii i zamiana go na ciepło, które podwyższa temperaturę ciała,
 2. refleksja – odbicie promieniowania od powierzchni i struktur wewnętrznych ciała w taki sposób, że promieniowanie zmienia kierunek i rozprasza się w otoczeniu,
 3. przenikanie – przejście promieniowania przez ciało bez zmiany kierunku.
- Zjawiska te przedstawiono na rys.2.



Rys.2. Strumień pochłonięty, odbity i przepuszczony

Definiuje się współczynniki absorpcji a , refleksji r i przenikania p :

$$a = \frac{\Phi_A}{\Phi}, a \leq 1 \quad (1)$$

$$r = \frac{\Phi_R}{\Phi}, r \leq 1 \quad (2)$$

$$p = \frac{\Phi_P}{\Phi}, p \leq 1 \quad (3)$$

Zależnie od wartości współczynników a , r i p rozróżniamy następujące, szczególne przypadki:

$a = 1, r = p = 0$ – ciało jest ciałem doskonale czarnym,

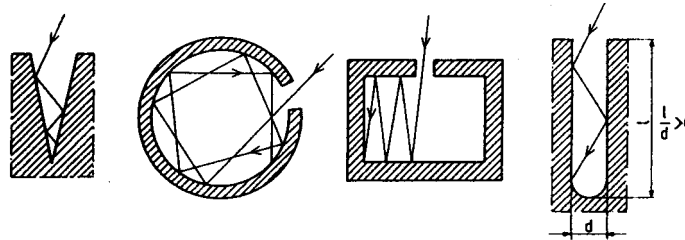
$r = 1, a = p = 0$ – ciało jest ciałem doskonale białym,

$p = 1, a = r = 0$ – ciało jest ciałem doskonale przezroczystym.

W każdym przypadku, zawsze suma wszystkich trzech współczynników jest równa jedności:

$$a + r + p = 1 \quad (4)$$

Na rys.3 przedstawiono przykładowe modele ciała doskonale czarnego



Rys.3. Przykładowe modele ciała doskonale czarnego

1.2. Prawo Planca

W wyniku pochłaniania części promieniowania padającego na ciało oraz w wyniku zachodzących w ciele przemian energetycznych (chemicznych, elektrotermicznych, jądrowych itp.) temperatura ciała podnosi się. Ciało posiadające temperaturę powyżej zera bezwzględnego staje się źródłem promieniowania cieplnego. W stanie termicznym ustalonym ilość energii pochłoniętej przez ciało jest równa ilości energii wypromieniowanej przez ciało.

Miarą ilości wypromieniowanej przez ciało energii jest emitancja, czyli natężenie promieniowania M :

$$M = \frac{dP}{dA} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (5)$$

P – moc promieniowania, w W ,

A – powierzchnia emitująca promieniowanie, w m^2 .

Ponieważ natężenie promieniowania M jest zależne od długości fali λ , definiuje się również monochromatyczne natężenie promieniowania M_λ :

$$M_\lambda = \frac{dM}{d\lambda} \left[\frac{W}{m^2 \cdot \mu m} \right] \quad (6)$$

Rozkład monochromatycznego natężenia promieniowania M_λ dla **ciała doskonale czarnego** opisuje prawo (równanie) Plancka:

$$M_\lambda = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp \frac{c_2}{\lambda T} - 1} \quad (7)$$

λ – długość fali promieniowania, w m ,

T – temperatura bezwzględna, w K

$c_1 = 2\pi^5 h^6 c^2 / 15 = 3,7415 \cdot 10^{-16} W/m^2$

$c_2 = hc^2/k = 1,438 \cdot 10^{-2} m \cdot K$

c – prędkość światła w próżni

h – stała Plancka

k – stała Boltzmanna

1.3. Prawo promieniowania Wiena i prawo przesunięć Wiena

Dla małych wartości iloczynu λT równanie Planca upraszcza się do postaci zwanej prawem promieniowania Wiena:

$$M_{\lambda} \cong \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp \frac{c_2}{\lambda T}} \quad (8)$$

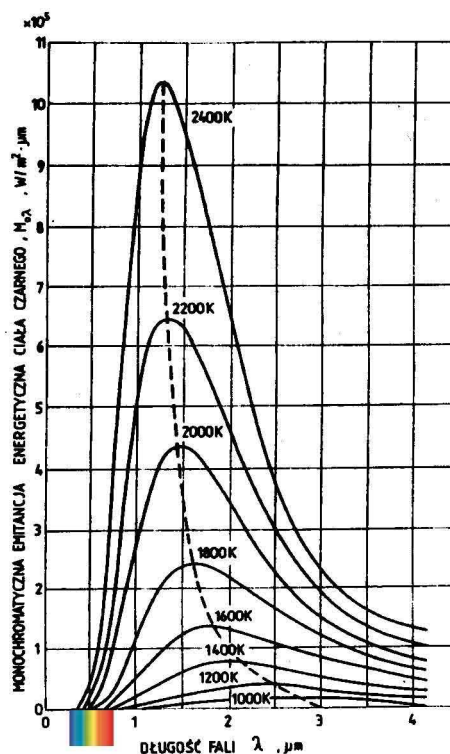
Na rys.4 przedstawiono wykres ilustrujący prawo Planca (również Wiena). Można zauważyć, że wzrost temperatury ciała powoduje przede wszystkim dwa efekty:

1.przesunięcie maksimum mocy promieniowania w kierunku krótszych fal, ten efekt opisuje prawo przesunięć Wiena (to inne prawo niż prawo Wiena).

2.powiększenie pola pod krzywą-zwiększenie całkowitej mocy promieniowania, ten efekt opisuje prawo Stefana-Boltzmana.

Należy również zwrócić uwagę na fakt, że większość mocy promieniowania przypada na zakres bliskiej podczerwieni o długości fali kilku mikrometrów oraz że moc przypadająca na zakres światła widzialnego jest bardzo mała. Wyznaczając pochodną funkcji opisanej prawem Wiena względem długości fali λ można wyznaczyć położenie maksimum wykresu natężenia promieniowania. Prawo przesunięć Wiena mówi, że iloczyn temperatury ciała T i długości fali λ_{max} dla której występuje maksimum charakterystyki promieniowania jest wartością stałą:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2896 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (9)$$



Rys.4. Wykres ilustrujący prawo promieniowania Planca

1.4. Prawo Stefana-Boltzmana

Całkowita moc promieniowania P_C ciała doskonale czarnego jest równa polu powierzchni pod krzywą opisaną prawem Wiena (8).

Może być więc obliczona na podstawie całki dla wszystkich długości fali λ od 0 do ∞ :

$$P_C = \int_0^{\infty} M_{\lambda} d\lambda = \sigma_0 T^4 \quad (10)$$

σ_0 – stała Stefana-Boltzmana:

$$\sigma_0 = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} = 5,6697 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$$

Prawo Stefana-Boltzmana mówi, że całkowita moc promieniowania P_C ciała doskonale czarnego jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury bezwzględnej T . Prawo Stefana-Boltzmana dla celów praktycznych zazwyczaj przedstawia się w postaci:

$$P_C = \sigma'_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (11)$$

σ'_0 – techniczna stała promieniowania ciała czarnego:

$$\sigma'_0 = \sigma_0 \cdot 10^8 = 5,6697 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$$

1.5. Promieniowanie ciała rzeczywistego

Ciało rzeczywiste wypromieniuje mniej energii w stosunku do ciała doskonale czarnego, zależnie od długości fali λ . Właściwość tę opisuje współczynnik emisyjności monochromatycznej ϵ_{λ} :

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{M_{S\lambda}}{M_{\lambda}} \quad (12)$$

Emisyjności monochromatyczna ϵ_{λ} jest to stosunek natężenia promieniowania ciała rzeczywistego $M_{S\lambda}$ przy długości fali λ do natężenia promieniowania ciała doskonale czarnego M_{λ} , przy tej samej długości fali. Jeśli w całym zakresie widma (czyli dla wszystkich długości fali λ od 0 do ∞) współczynnik emisyjności monochromatycznej ϵ_{λ} ma wartość stałą:

$$\epsilon_{\lambda} = \text{const},$$

to takie ciało nazywamy **ciałem szarym**.

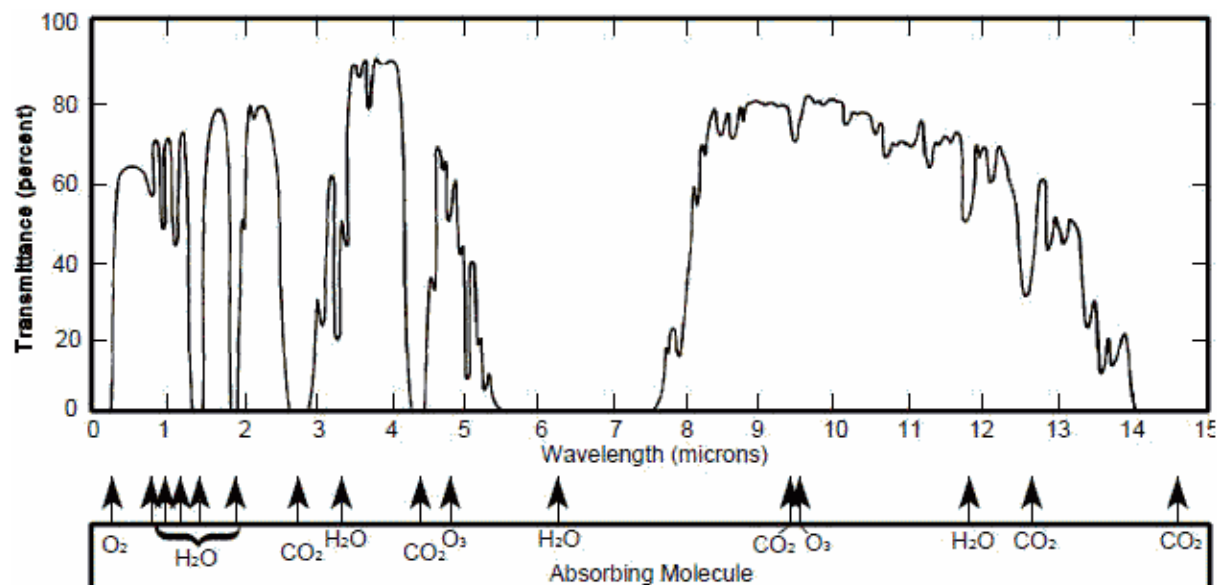
Stosunek całkowitej mocy wypromieniowanej przez ciało szare P_S do całkowitej mocy wypromieniowanej przez ciało doskonale czarne P_C w tej samej temperaturze nazywamy **emisyjnością** (lub współczynnikiem emisyjności) ciała szarego ϵ :

$$\epsilon = \frac{P_S}{P_C} = \frac{\int_0^{\infty} M_{S\lambda} d\lambda}{P_C} \quad (13)$$

Emisyjność spotykanych w praktyce ciał wynosi od 0,05 (polerowane metale) do 0,95 (tworzywa sztuczne, czernione metale, materiały budowlane, farby). Tabele z wartościami emisyjności dla różnych ciał znajdują się w dokumentacji pirometru i kamery termowizyjnej oraz w literaturze [1] .. [4].

1.6. Transmisyjność atmosfery

Promieniowanie rozchodzące się w atmosferze ziemskiej jest tłumione w różnym stopniu, zależnie od długości fali. Do celów pirometrii wyróżnia dwa tzw. okna pomiarowe w zakresie podczerwieni, w których tłumienie jest szczególnie małe. Na rys.5 przedstawiono transmisyjność atmosfery ziemskiej na dystansie 1 mili morskiej na poziomie morza. Silne tłumienie w wąskich pasmach długości fali jest związane głównie z występowaniem w atmosferze cząsteczek pary wodnej i dwutlenku węgla. Widoczne są okna pomiarowe w zakresie podczerwieni dla długości fali: $2 \mu\text{m} \div 5 \mu\text{m}$ oraz $8 \mu\text{m} \div 14 \mu\text{m}$.



Rys.5. Transmisyjność atmosfery ziemskiej na dystansie 1 mili morskiej na poziomie morza.

2. POMIARY PIROMETRYCZNE

2.1. Zasady działania pirometrów

Współcześnie produkowane są pirometry działające na różnych zasadach:

1. pirometry monochromatyczne, działające w oparciu o prawo Plancka (Wiena) – monochromatyczna emisyjność jest jednoznaczną funkcją temperatury,

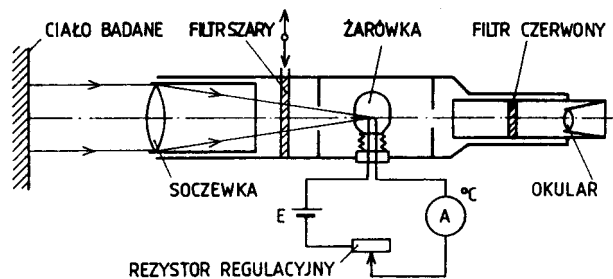
2. pirometry dwubarwowe, działające w oparciu o prawo przesunięć Wiena – wraz ze wzrostem temperatury maksimum energii promieniowania przesuwa się w kierunku krótszych fal, barwa promieniowania zmienia się z czerwieni w kierunku zieleni,

3. pirometry całkowitego promieniowania (pirometry radiacyjne), działające w oparciu o prawo Stefana-Boltzmana – całkowita moc wypromieniowana przez ciało jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury,

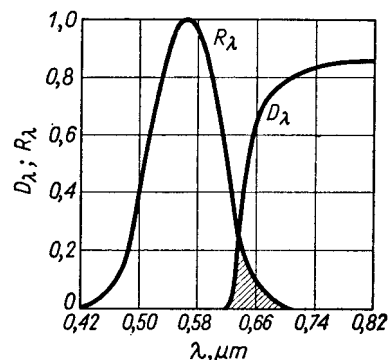
4. pirometry pasmowe zbliżone zasadą działania do pirometrów całkowitego promieniowania, ale reagujące na promieniowanie tylko w pewnym zakresie długości fali.

2.2. Pirometry monochromatyczne

Najczęściej stosowanym pirometrem monochromatycznym jest pirometr z zanikającym włóknem. Wykorzystuje on zależność (8) opisującą prawo Wiena, z którego wynika, że monochromatyczna emisyjność jest jednoznaczną funkcją temperatury. Budowę pirometru monochromatycznego przedstawiono na rys.6. Podstawowym elementem jest specjalna, skalibrowana żarówka o znanej charakterystyce temperatury włókna w funkcji prądu. Pomiar polega na takim dobraniu wartości prądu płynącego przez żarówkę, aby obserwator zaobserwował pozorne zniknięcie włókna żarówki na tle badanego ciała. Oznacza to, że temperatura włókna żarówki i badanego ciała sobie równe. Skala amperomierza wprost wyskalowana jest w stopniach Celsjusza. Dodatkowy filtr szary służy do rozszerzenia zakresu pomiarowego. Filtr czerwony ułatwia pomiar ograniczając pasmo obserwowanego promieniowania. Charakterystykę typowego filtra czerwonego i oka ludzkiego przedstawiono na rys.7. Efektywna długość fali przy której następuje pomiar wynosi typowo 0,65 μm .



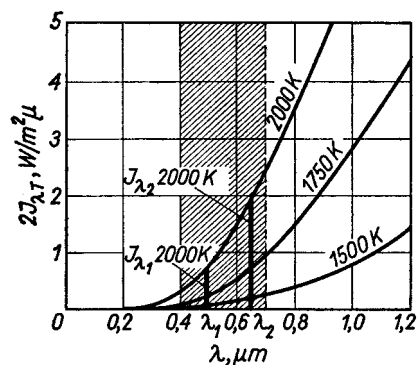
Rys.6. Budowa pirometru monochromatycznego z zanikającym włóknem



Rys.7. Charakterystyka filtru czerwonego i oka ludzkiego

2.3 Pirometry dwubarwowe

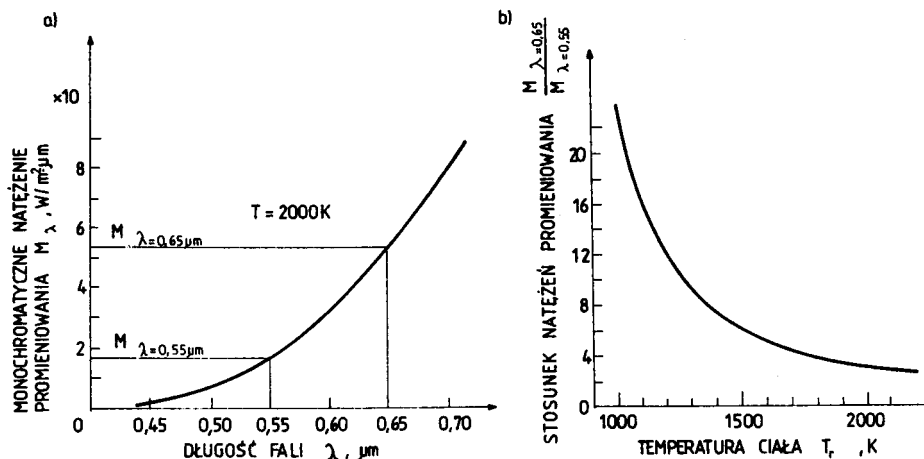
Wadą pirometrów monochromatycznych jest silna zależność wskazań od emisyjności ε badanego ciała. Wady tej nie posiadają pirometry dwubarwowe działające w oparciu o prawo przesunięć Wiena. Wraz ze wzrostem temperatury maksimum energii promieniowania przesuwa się w kierunku krótszych fal, a barwa promieniowania zmienia się z czerwieni w kierunku zieleni. Przedstawiono to na rys. 8, który jest powiększonym fragmentem wykresu z rys.4. Typowo mierzony jest stosunek mocy promieniowania dla długości fali czerwonej $0,65\mu\text{m}$ i zielonej $0,55\mu\text{m}$.



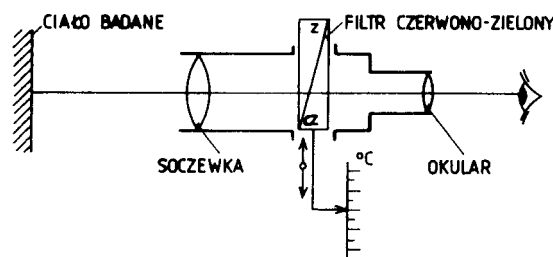
Rys.8. Moc promieniowania dla dwóch długości fali (czerwonej i zielonej)

Na rys.9 przedstawiono stosunek mocy promieniowania przy długości fali czerwonej $0,65\mu\text{m}$ i zielonej $0,55\mu\text{m}$ dla temperatur w przedziale do 2000K. Jest widoczne, że dla temperatur wyższych czułość tej metody pomiaru maleje, natomiast dokładniejsze pomiary uzyskuje się dla niższych temperatur, gdzie charakterystyka jest bardziej stroma. Na rys.10 przedstawiono przykładową konstrukcję pirometru dwubarwowego, wykorzystującego specjalny filtr czerwono-zielony o zmiennym stosunku tłumienia dla tych długości fali. Pomiar

polega na ustawieniu położenia filtru, dla którego obserwowany obiekt będzie widziany jako jednolicie szary.



Rys.9. Stosunek mocy promieniowania dla długości fali czerwonej $0,65\mu m$ i zielonej $0,55\mu m$

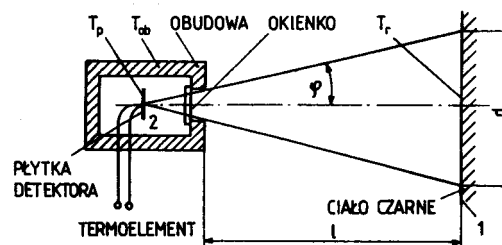


Rys.10. Budowa pirometru dwubarwowego

Iloraz natężeń promieniowania dla $\lambda=0,65\mu m$ (barwa czerwona) i $\lambda=0,55 \mu m$ (barwa zielona) zależy od temperatury, ale nie zależy od emisyjności ϵ dla ciała szarego ($\epsilon_{\lambda 1} = \epsilon_{\lambda 2}$). Dla większości ciał warunek ten jest spełniony z wystarczającą dokładnością. Dzięki temu wskazania pirometru dwubarwowego **nie zależą od emisyjności ϵ ciała badanego**.

2.4. Pirometry całkowitego promieniowania (radiacyjne)

Pirometry całkowitego promieniowania (pirometry radiacyjne), działające w oparciu o prawo Stefana-Boltzmana (10) z którego wynika, że całkowita moc wypromieniowana przez ciało jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury.



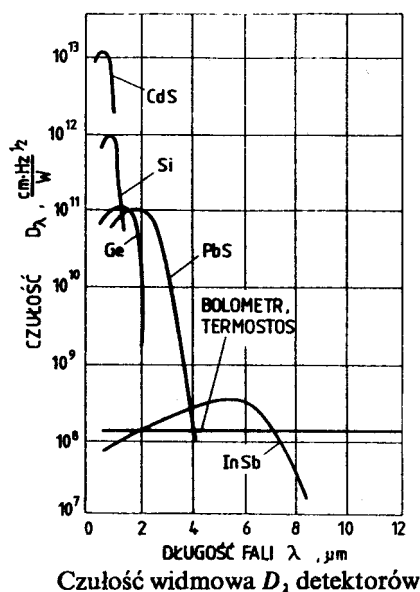
Pirometr radiacyjny – uproszczone przedstawienie konstrukcji

Rys.11. Budowa pirometru całkowitego promieniowania

Budowę pirometru radiacyjnego przedstawiono na rys.11. Na płytkę detektora pada promieniowanie z badanego ciała i zwiększa jego temperaturę. Miarą temperatury ciała badanego jest różnica temperatury detektora i obudowy pirometru. Można wykazać, że moc

wydzielona w detektorze **nie zależy od odległości** l detektora od ciała promieniującego, pod warunkiem, że pole o powierzchni A „widziane” przez płytkę detektora, w całości leży na promieniującym ciele. Stosunek odległości l pirometru od ciała badanego do średnicy D obszaru promieniującego (l/D) zapewniający poprawny wynik pomiaru, dla danego typu pirometru nazywany jest **współczynnikiem odległościowym**.

W pirometrach radiacyjnych stosuje się detektory termiczne (termostoty, bolometry), detektory fotoelektryczne (fotorezystory PbS, CdS, fotoogniwa InSb, InAs, fotodiody Ge, Si, detektory fotoemisyjne (próżniowe, gazowane). Na rys.12 przedstawiono przykładowe charakterystyki niektórych rodzajów detektorów. Należy zwrócić uwagę na płaską charakterystykę detektorów termicznych w szerokim zakresie długości fali promieniowania.



Rys.12. Czułość widmowa detektorów stosowanych w pirometrach radiacyjnych

Wskazania pirometru radiacyjnego silnie zależą od emisyjności ε rzeczywistej ciała, niewłaściwa wartość ε powoduje błędy. Dla ciała nie czarnego (szarego) wskazania pirometru radiacyjnego będą **zaniżone** ($\varepsilon < 1$). Aby otrzymać poprawne wskazania temperatury T ciała szarego (nie czarnego), należy wskazania pirometru radiacyjnego T_p **skorygować** odpowiednio do rzeczywistego współczynnika emisyjności ε badanego ciała (14). Nie uwzględnienie współczynnika poprawkowego (15) spowoduje duże błędy pomiaru (dla $\varepsilon = 0,2$ błąd wyniesie 50%).

$$T = k_{popr} T_p = \frac{1}{\sqrt[4]{\varepsilon}} T \quad (14)$$

$$k_{popr} = \frac{1}{\sqrt[4]{\varepsilon}} \quad (15)$$

Znajomość rzeczywistego współczynnika emisyjności ε badanego ciała jest niezbędna do wykonania poprawnego pomiaru. Gdy wartość ta jest nieznaną, stosowane są inne sposoby wykonania pomiaru temperatury pirometrem przy nieznannej emisyjności ε obiektu:

1. Oklejenie obiektu czarną taśmą samoprzylepną PCV ($\varepsilon = 0,95$),
2. Pomalowanie obiektu czarną matową farbą ($\varepsilon = 0,95$),
3. Pomiar kontrolny temperatury termoparą i dobranie doświadczalnie ustawienia emisyjności ε .

Należy zauważyć, że mnożnik poprawkowy k_{popr} dla promieniowania monochromatycznego jest **kilkakrotnie mniejszy**, niż dla promieniowania całkowitego. Przy nieznannej emisyjności ciała ε pirometry monochromatyczne są więc dokładniejsze od pirometrów radiacyjnych.

2.5. Pirometry pasmowe (fotoelektryczne)

Detektory pirometrów radiacyjnych są stosunkowo wolne i w praktyce uniemożliwiają pomiar szybkozmiennych temperatur. W pirometrach pasmowych stosuje się szybkie detektory fotoelektryczne, ale reagujące na promieniowanie tylko w pewnym zakresie długości fal $\lambda_1 .. \lambda_2$. Dla takich detektorów zależność (14) na skorygowaną wartość temperatury mierzonej T ulega modyfikacji:

$$T = k_{popr} T_P = \frac{1}{\sqrt[n]{\varepsilon(\lambda_1 \div \lambda_2)}} T \quad (16)$$

Współczynnik $\varepsilon(\lambda_1 \div \lambda_2)$ jest średnią emisyjnością ciała w zakresie długości fal $\lambda_1 .. \lambda_2$, a wykładnik pierwiastka n zawiera się w granicach od 5 do 12. Pirometry fotoelektryczne stanowią najliczniejszą grupę wśród oferowanych obecnie pirometrów. Pewną niedogodnością jest bardziej skomplikowana zależność na skorygowaną wartość mierzonej temperatury (16) w zależności od emisyjności pasmowej ciała. Pirometry te najczęściej wykorzystują okno pomiarowe w podczerwieni $2 \mu\text{m} \div 5 \mu\text{m}$ lub $8 \mu\text{m} \div 14 \mu\text{m}$.

3. TERMOWIZJA

Termowizja (termografia) rozszerza możliwości pirometrów na obrazowanie rozkładu przestrzennego pola temperatury na powierzchni ciała. W kamerach termowizyjnych stosuje się szybkie detektory fotoelektryczne pracujące w oknie pomiarowym w zakresie podczerwieni $2 \mu\text{m} \div 5 \mu\text{m}$ lub $8 \mu\text{m} \div 14 \mu\text{m}$. Spotyka się trzy podstawowe konstrukcje kamer termowizyjnych:

1. z punktowym detektorem i skanowaniem mechanicznym w dwóch kierunkach za pomocą zespołu ruchomych lusterek lub pryzmatów.
2. z detektorem liniowym do skanowania przedmiotów w ruchu: taśmy blachy walcowanej na gorąco, odkówki itp.
3. z detektorem matrycowym i optycznym układem skupiającym soczewkowym lub lustrzanym.

4. OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO

Stanowisko pomiarowe wyposażone jest w dwa źródła ciepła. Pierwsze z nich składa się z kołowego źródła ciepła z grzałką rezystancyjną o mocy 1,5 kW/220V. W celu ograniczenia temperatury pracy kołowe źródło ciepła zasilane jest napięciem ograniczonym do wartości około 50 V. Dzięki temu temperatura pracy tego źródła ciepła wynosi około 115°C. Kołowe źródło ciepła dodatkowo posiada termostat oraz ekran termiczny wykonany z wełny mineralnej o grubości 6cm oklejonej obustronnie folią aluminiową. Termostat ustawiony na pozycję 2 ogranicza temperaturę grzałki do ok. 150°C.

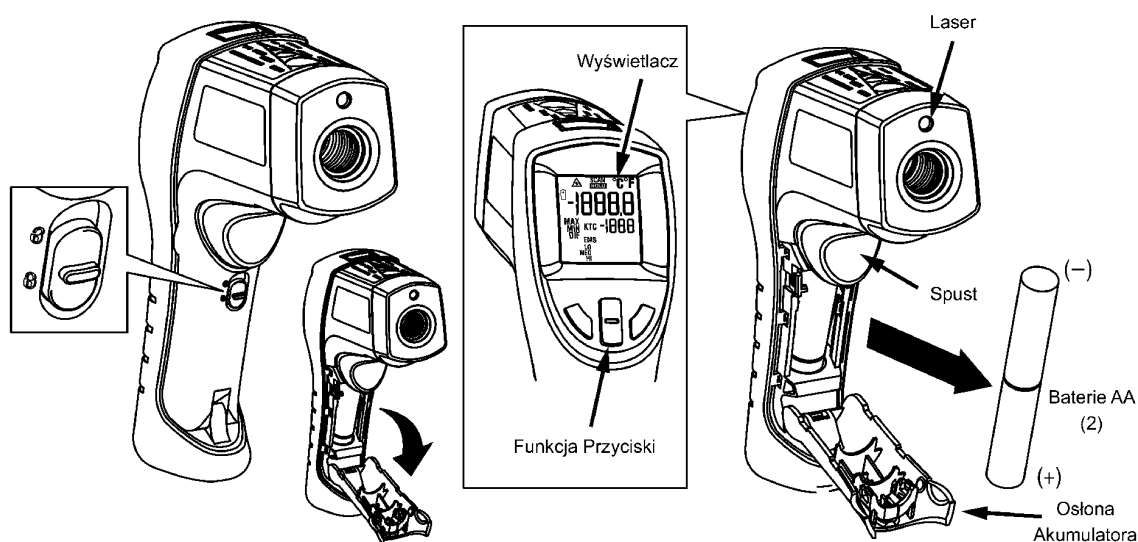
Drugie źródło ciepła stanowi grzejnik olejowy. Na powierzchni bocznej grzejnika naklejone zostały odcinki folii aluminiowej oraz czarnej folii PCV. Pod foliami utworzone są pionowe kanaliki umożliwiające umieszczenie w nich spiny pomiarowej termopary

współpracującej z pirometrem. Termostat grzejnika olejowego ustawiony na pozycję 3 ogranicza temperaturę do około 100°C.

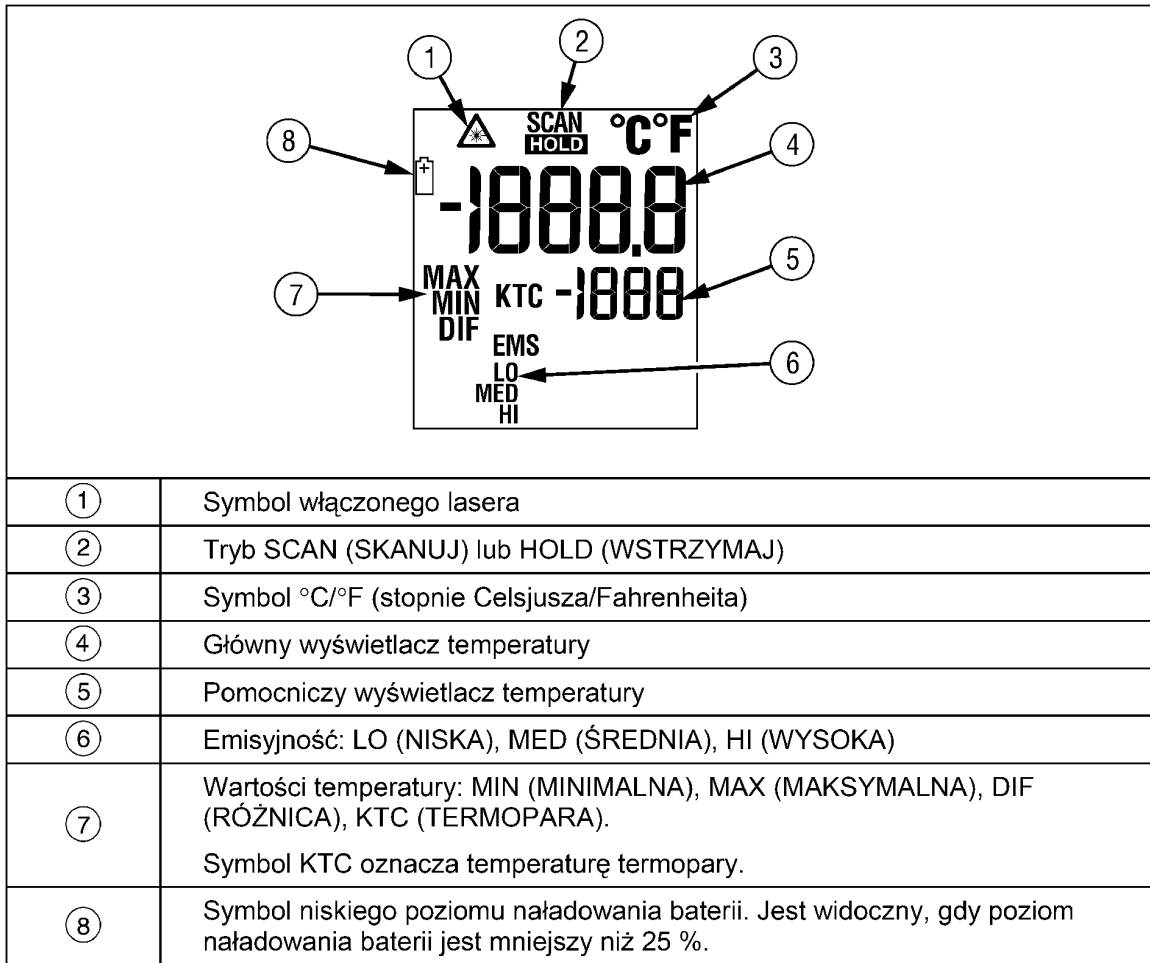
Na stanowisku wykorzystywane są dwa przyrządy pomiarowe: pirometr Fluke 561 i kamera termowizyjna Fluke Ti20. Na rys.13 przedstawiono najważniejsze parametry pirometru Fluke 561, jego konstrukcję mechaniczną przedstawiono na rys.14, organizację wyświetlacza na rys.15 oraz funkcje przycisków sterujących na rys.16.

Zakres pomiarowy	od -40 °C do 550 °C (od -40 °F do 1022 °F)
Zakres spektralny	od 8 do 14 mikronów
Dokładność	± 1% lub ± 1 °C (2 °F); <0 °C (32 °F), ± 1 °C (2 °F) ± 0,1°/1° (przy temperaturze otoczenia od 23 do 25 °C (od 73 do 77 °F))
Powtarzalność	± 0,5 % wartości lub ± 1 °C (2 °F)
Rozdzielczość	0,1 °C (0,1 °F)
Informacje na wyświetlaczu pomocniczym	temperatura maksymalna, temperatura minimalna, różnica, podłączenie termopary typu K
Czas odpowiedzi (95%)	500 ms
Stosunek odległości do powierzchni pomiaru (D:S)	12:1
Dostosowywanie emisyjności	trzy ustawienia: niska (0,3), średnia (0,7) i wysoka (0,95)
Dane wejściowe sondy kontaktowej	
Zakres temperatury wejściowej	od -40 °C do 550 °C (od -40 °F do 1022 °F)
Dokładność danych wejściowych	Dokładność danych wejściowych ± 1,1 °C (± 2 °F)
Rozdzielczość	1 °C (1 °F)

Rys.13. Najważniejsze parametry pirometru Fluke 561



Rys.14. Pirometr Fluke 561, konstrukcja mechaniczna



Rys.15. Wyświetlacz pirometru Fluke 561

Przycisk/ Złącze	Opis
	Naciśnij przycisk , a następnie użyj przycisku do przełączania między opcjami MIN (MINIMALNA), MAX (MAKSYMALNA) i DIF (RÓŻNICA).
	Przycisk służy do wybierania wartości MIN, MAX lub DIF, która będzie wyświetlana na wyświetlaczu pomocniczym.
	Umożliwia wybranie ustawienia emisyjności. Za pomocą przycisku można przełączać się między opcjami LO (NISKA=0,3), MED (ŚREDNIA=0,7) lub HI (WYSOKA=0,95).
	Sonda z termoparą typu K służąca do pomiaru temperatury przez kontakt z obiektem.

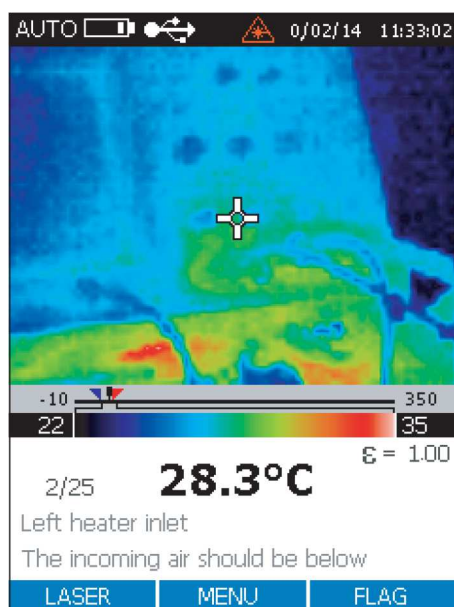
Rys.16. Przyciski sterujące pirometru Fluke 561

Na rys.17 przedstawiono najważniejsze parametry kamery Ti20. Organizację wyświetlacza kamery pokazano na rys. 18. W górnej części znajduje się nagłówek ekranu z informacjami o aktualnym stanie kamery. W środkowej części znajduje się obszar ekranu

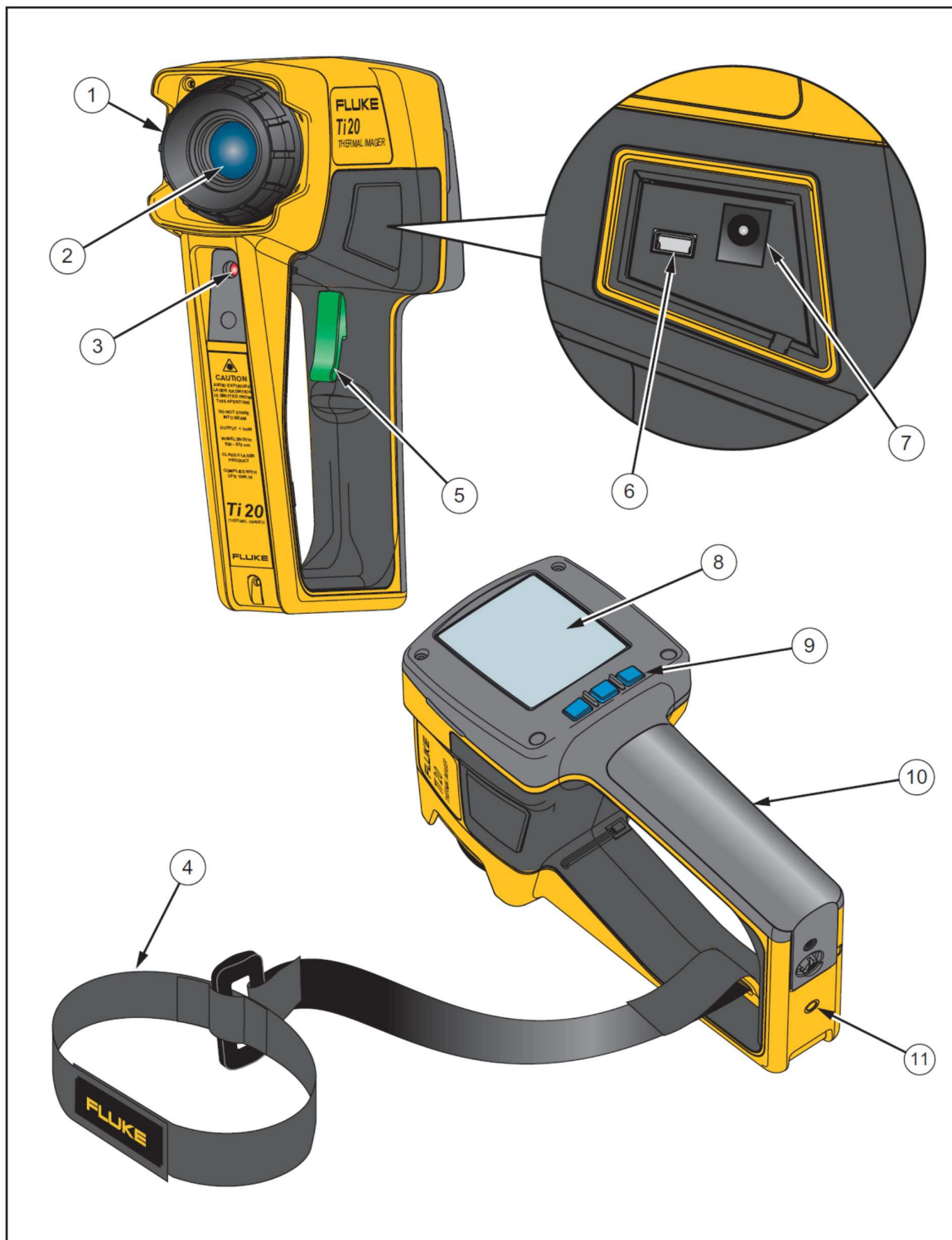
termicznego. W dolnej części znajduje się obszar informacyjny z aktualną paletą barw, zakresem pomiarowym i wynikiem pomiaru temperatury w centralnym punkcie ekranu. Wyświetlana jest również aktualnie ustawiona wartość ε , numer komórki pamięci i liczba zajętych komórek, opis obrazu termicznego (wprowadzany poprzez złącze USB z komputera PC) oraz opis znaczenia przycisków sterujących. Na rys.19 przedstawiono konstrukcję kamery Ti20. Pierścieniem 1 należy ustawić ostrość oglądanego na ekranie 8 obrazu termicznego. Przycisk 5 umożliwia zapamiętanie obrazu aktualnego obrazu termicznego w pamięci kamery. Obrazy z pamięci kamery można poprzez złącza USB 6 skopiować do komputera PC. Wskaźnik laserowy 3 ułatwia nakierowanie kamery na badany obiekt. Przyciski 9 umożliwiają obsługę kamery. Środkowy przycisk umożliwia załączanie i wyłączanie kamery poprzez dłuższe przyciśnięcie (2s). Aktualne znaczenie przycisków pokazywane jest w dolnej linijce wyświetlacza LCD.

Temperature Range.....	-10 to 350 °C (14 to 662 °F)
Detector Type	80 x 60 thermal element focal plane array (FPA)
Accuracy	± 2 °C or 2 % (whichever is greater)
Repeatability	± 1 % or ± 1 °C (± 2 °F) whichever is greater
NETD (Thermal Sensitivity)	200 mK
Temperature Indication	0.1 °C or 0.2 °F
Field of View (FOV).....	Rectangular. 20° Horizontal x 15° Vertical
Minimum Diameter.....	8.1 mm (0.32 in) at 61 cm (24 in)
Optical Resolution (D:S)	75:1 or better
Spectral Range	7.5 to 14 microns
Focus	61 cm (24 in) to infinity
Temperature Scale	°C or °F selectable
Palettes	Original, Gray, Rainbow (default), Ironbow, Gray Reverse
Measurement Modes	Automatic or Manual
Adjustable Emissivity10 to 1.00 by 0.01
Liquid Crystal Display	70.5 mm (2.78 in) x 53.5 mm (2.1 in)

Rys.17. Najważniejsze parametry kamery Ti20



Rys.18. Wyświetlacz kamery Ti20, od góry: obszar nagłówka, obraz termiczny i obszar informacyjny z paletą barw, zakresem pomiarowym i wynikiem pomiaru i opisem aktualnego znaczenia przycisków sterujących



Rys.19. Konstrukcja mechaniczna kamery Ti20: 1-regulacja ostrości, 2-objektyw, 3-wskaźnik laserowy, 4-opaska zabezpieczająca, 5-przycisk rejestracji obrazów termicznych, 6-złącze USB, 7-gniazdo zasilania, 8-ekran, 9-przyciski, 10-pojemnik na akumulatory, 11-gniazdo mocowania na statywie

5. WYKONANIE POMIARÓW

5.1. Zasady bezpieczeństwa

Na stanowisku pomiarowym zastosowane są źródła ciepła mogące spowodować oparzenia ciała oraz wykorzystywane są przyrządy pomiarowe emitujące promieniowanie laserowe mogące uszkodzić narządy wzroku człowieka. Dodatkowo należy zwrócić szczególną uwagę na delikatne elementy optyczne stosowanych przyrządów pomiarowych. Z tych powodów na stanowisku pomiarowym obowiązują następujące zasady bezpieczeństwa:

1) **Zabrania się** bezpośredniego dotykania ręką lub inną częścią ciała elementów źródeł ciepła posiadających temperaturę wyższą od temperatury otoczenia, za wyjątkiem przeznaczonych do tego celu uchwytów zainstalowanych fabrycznie.

2) **Zabrania się** przestawiania termostatów na pozycje wyższe od podanych w instrukcji do ćwiczenia. Maksymalne nastawy termostatów wynoszą: dla kołowego źródła ciepła pozycja 2 (**druga**) termostatu, dla grzejnika olejowego pozycja 3 (**trzecia**) termostatu.

3) **Zabrania się** zasilania kołowego źródła ciepła bezpośrednio z sieci energetycznej 230V. Bezwzględnie należy stosować transformator regulacyjny ustawiony maksymalnie napięcie 50V (**pięćdziesiąt woltów**). Napięcie zasilania kołowego źródła ciepła należy kontrolować woltomierzem. Grzejnik olejowy zasilany jest bezpośrednio z sieci 230V.

4) **Zabrania się** kierować wiązkę promieniowania laserowego w stronę narządów wzroku ludzi i zwierząt. Bezpośrednie patrzenie w otwór emitujący promieniowanie laserowe grozi nieodwracalnym uszkodzeniem wzroku.

5) **Zabrania się** dotykania palcami i innymi przedmiotami soczewek obiektywów i innych elementów optyki kamery termowizyjnej i pirometru.

6) **Zabrania się** jakiegokolwiek czyszczenia elementów optycznych kamery termowizyjnej i pirometru.

7) **Zabrania się** narażania kamery termowizyjnej i pirometru na jakiegokolwiek wstrząsy, uderzenia i upadki. Wszystkie takie zdarzenia mogą trwale uszkodzić te delikatne przyrządy pomiarowe. Po zakończeniu pomiarów należy je zawsze niezwłocznie odkładać do oryginalnych pudełek ochronnych.

UWAGA!!! STUDENCI NIEPRZESTRZEGAJĄCY POWYŻSZYCH ZASAD BEZPIECZEŃSTWA BĘDĄ NATYCHMIAST USUWANI Z LABORATORIUM Z OCENĄ NIEDOSTATECZNĄ !!!

5.2. Przygotowanie stanowiska do pomiarów

a) W celu sprawnego przeprowadzenia pomiarów bezwzględnie konieczne jest wcześniejsze zapoznanie się studentów z dostępną w sieci Internet dokumentacją przyrządów pomiarowych i specjalistycznego oprogramowania:

1. Infrared Thermometer 561 Instrukcja użytkownika,
2. Infrared Thermometer 561 Quick Reference Guide,
3. Thermal Imager Ti20 Users Manual,
4. Thermal Imager Ti20 Quick Reference Guide,
5. InsideIR Thermal Image Analysis Software Users Manual.

b) Sprawdzić i ewentualnie skorygować ustawienia termostatów źródeł ciepła: dla kołowego źródła ciepła pozycja 2 (**druga**) termostatu, dla grzejnika olejowego pozycja 3 (**trzecia**) termostatu.

c) Włączyć zasilanie kołowego źródła ciepła. Ustawić napięcie zasilania kołowego źródła ciepła na transformatorze regulacyjnym na 50V (**pięćdziesiąt woltów**). Napięcie zasilania kołowego źródła ciepła należy kontrolować woltomierzem.

d) Włączyć grzejnik olejowy zasilany bezpośrednio z sieci 230V

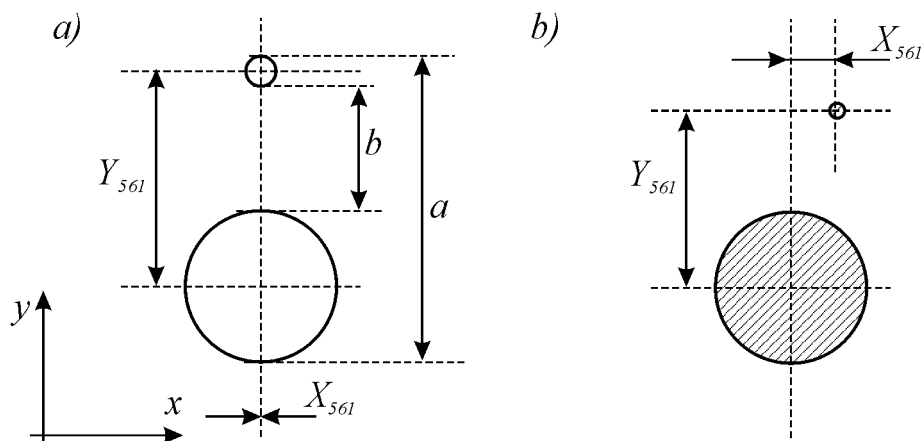
e) Zanotować do protokołu w tabeli 1 godzinę załączenia zasilania źródeł ciepła. Pomiaru wymagające stabilnej temperatury źródeł ciepła należy rozpocząć po ok. pół godziny od załączenia ich zasilania.

5.3. Badanie wskaźnika laserowego pirometru 561

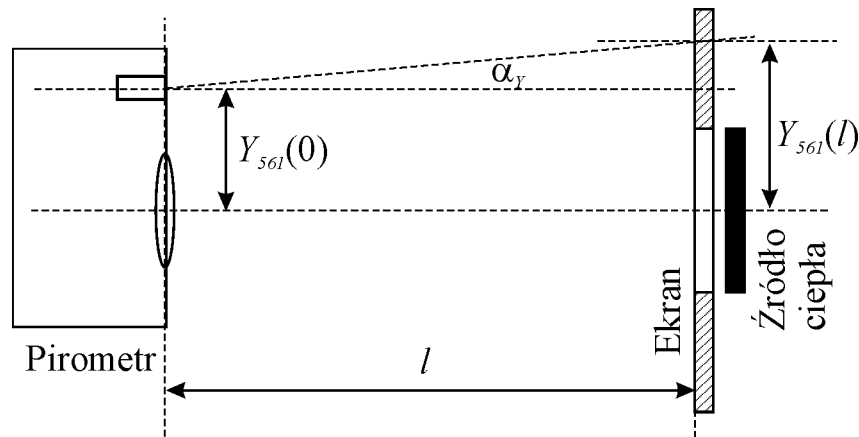
a) Zmierzyć według rys.20a w pirometrze FLUKE 561 i zanotować w tabeli 1 wymiary a , b oraz obliczyć według wzoru (17) odległość w kierunku pionowym Y_{561} osi optycznych układu pomiarowego i celownika laserowego. Odległość osi optycznych w kierunku poziomym X_{561} przyjąć równą zero.

b) Założyć na ekran termiczny kołowego źródła ciepła dodatkową przesłonę z otworem o średnicy $D=20\text{mm}$. Z odległości $l=250\text{mm}$ ustalić położenie układu optycznego pirometru 561 na wprost otworu w przesłonie, zapewniające uzyskanie największego odczytu temperatury. Na podstawie położenia plamki celownika laserowego na przesłonie ekranu termicznego odczytać według rys.20b i zanotować w tabeli 1 odległość osi optycznych układu pomiarowego i celownika laserowego w kierunku pionowym $Y_{561}(l)$ oraz w kierunku poziomym $X_{561}(l)$.

c) Obliczyć według wzorów (18), (19) błędy równoległości osi optycznych układu pomiarowego i celownika laserowego w kierunku pionowym α_{Y561} i poziomym α_{X561} . Wyniki zapisać do tabeli 1. Zasadę obliczeń przedstawia rys.21.



Rys.20. Badanie wskaźnika laserowego pirometru 561 i kamery Ti20: a) odczyt wymiarów z obudowy pirometru, b) odczyt wymiarów z przesłony ekranu termicznego



Rys. 21. Zasada obliczania błędu równoległości osi optycznych układu pomiarowego i celownika laserowego w kierunku pionowym α_{y560}

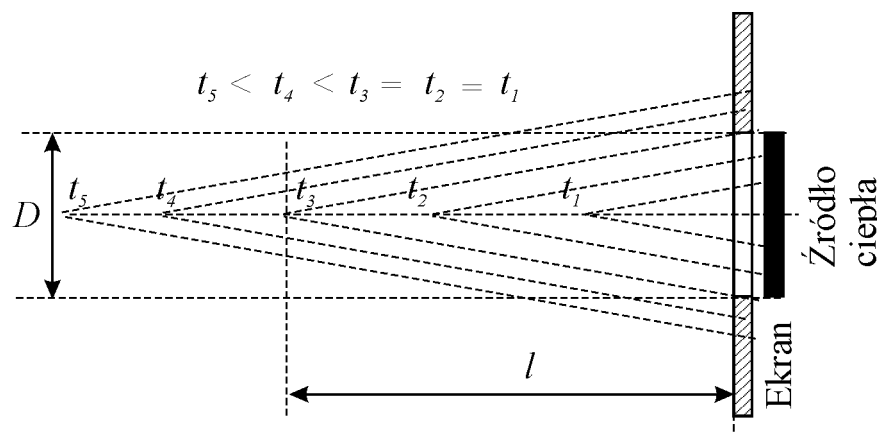
5.4. Wyznaczanie współczynnika odległościowego pirometru

a) Usunąć z ekranu termicznego dodatkowe przesłony. Zmierzyć i zanotować w tabeli 2 średnicę D otworu w ekranie termicznym oraz wyznaczoną w punkcie poprzednim odległość w kierunku pionowym Y_{561} osi optycznych układu pomiarowego i celownika laserowego pirometru 561. Z danych technicznych zapisać do tabeli 2 wartość błędu granicznego pirometru (*ang. Accuracy*).

b) Uwzględniając wartość Y_{561} utrzymywać oś optyczną pirometru 561 nakierowaną na środek kołowego źródła ciepła i wykonać serię 11 pomiarów temperatury t (w $^{\circ}\text{C}$) kołowego źródła ciepła. Odległość l pirometru 561 od ekranu termicznego zmieniać równomiernie od zera do 3 metrów. Wyniki zapisywać w tabeli 2.

c) Przedstawić na wykresie zależność wyniku pomiaru temperatury t od stosunku odległości do średnicy l/D . Odczytać z wykresu i zapisać do tabeli 2 współczynnik odległościowy $l:D$ pirometru 561, dla którego wynik pomiaru nie zależy od odległości, a błąd pomiaru temperatury Δt liczony względem pierwszego pomiaru nie przekracza wartości błędu granicznego (*Accuracy*). Zasadę wyznaczania współczynnika odległościowego zilustrowano na rys.22.

d) Odczytać z dokumentacji pirometru 561 i zapisać do tabeli 2 współczynnik odległościowy $D:S$ (*Distance:Spot Size*).



Rys. 22. Zasada wyznaczania współczynnika odległościowego $l:D$

5.5. Wyznaczanie współczynnika emisyjności ϵ za pomocą pirometru

a) Dołączyć do pirometru 561 termoparę. Spoinę pomiarową termopary umieścić centralnie w pionowym kanaliku pod folią aluminiową naklejoną na bocznej powierzchni grzejnika olejowego. Zmierzyć szerokość c i wysokość d folii aluminiowej. Na podstawie współczynnika odległościowego $l:D$ obliczyć maksymalną odległość pomiaru temperatury l_{max} oraz zaplanować rzeczywistą odległość pomiaru $l_{pom} < l_{max}$. Ustawić w pirometrze współczynnik emisyjności ϵ_{ust} na wartość LO. Z dokumentacji pirometru zapisać wartość liczbową emisyjności ϵ_{licz} . Odczekać około minuty na ustabilizowanie się temperatury spoiny pomiarowej termopary. Uwzględniając przyjętą odległość l_{pom} oraz wyznaczoną wcześniej Y_{561} skierować pirometr na spoinę pomiarową termopary wykorzystując wskaźnik laserowy. Wykonać pomiar temperatury pirometrem t_{PIR} (wyświetlacz główny pirometru, rys.15) i termoparą t_{TP} (wyświetlacz dodatkowy pirometru, rys.15). Wyniki zapisać w tabeli 3. Obliczyć błąd pomiaru temperatury od współczynnika emisyjności Δt_ϵ według wzoru (20).

b) Powtórzyć pomiary według punktu a) dla ustawionego współczynnika emisyjności ϵ_{ust} na wartości kolejno: MED oraz HI. Na podstawie obliczonych błędów pomiaru temperatury Δt_ϵ ustalić i zanotować w tabeli 3 wartość optymalną współczynnika emisyjności ϵ_{opt} dla folii aluminiowej.

c) Przełożyć termoparę do kanaliku pod czarną folią PCV i powtórzyć wszystkie pomiary według punktu a) i b) notując wyniki w kolejnych wierszach tabeli 3.

d) Pozostawiając termoparę w kanaliku pod czarną folią PCV powtórzyć wszystkie pomiary według punktu a) i b) kierując pirometr bezpośrednio na powierzchnię grzejnika pokrytą fabrycznie farbą, na obszarze możliwie bliskim spoiny pomiarowej termopary. Wyniki notować w kolejnych wierszach tabeli 3.

5.6. Badanie powtarzalności wyników pomiarów pirometrem 561

a) Umieścić (pozostawić po poprzednim punkcie) termoparę w kanaliku pod czarną folią PCV. Ustawić w pirometrze i zanotować w tabeli 4 ustaloną w punkcie 5.5 optymalną wartość emisyjności ϵ_{opt} dla czarnej folii PCV. Zanotować szerokość c i wysokość d czarnej folii PCV oraz zaplanować rzeczywistą odległość pomiaru $l_{pom} < l_{max}$.

b) Uwzględniając przyjętą odległość l_{pom} oraz wyznaczoną wcześniej Y_{561} skierować pirometr na spoinę pomiarową termopary wykorzystując wskaźnik laserowy. Wykonać serię 10 pomiarów temperatury pirometrem t_{PIR} (wyświetlacz główny pirometru) i termoparą t_{TP} (wyświetlacz dodatkowy pirometru). Wyniki zapisać w tabeli 4. Dla pomiarów pirometrem i termoparą obliczyć niezależnie wartości średnie zmierzonych temperatur, odchylenia standardowe σ oraz szerokości przedziału trzysigmowego 3σ .

5.7. Badanie wskaźnika laserowego kamery termowizyjnej Ti20

a) Badanie wskaźnika laserowego kamery termowizyjnej Ti20 należy przeprowadzić analogicznie jak dla pirometru 561. W tabeli 5 zapisać wymiary a , b oraz obliczyć odległość w kierunku pionowym Y_{Ti20} osi optycznych układu pomiarowego i celownika laserowego. Odległość osi optycznych w kierunku poziomym X_{Ti20} przyjąć równą zero.

b) Założyć na ekran termiczny kołowego źródła ciepła dodatkową przesłonę z otworem o średnicy $D=20\text{mm}$. Z odległości $l=1500\text{mm}$ (1,5m) ustalić położenie układu optycznego kamery Ti20 na wprost otworu w przesłonie, zapewniające uzyskanie największego odczytu temperatury. Załączyć wskaźnik laserowy. Na podstawie położenia plamki celownika laserowego na przesłonie ekranu termicznego odczytać według rys.20b i zanotować w tabeli 5 odległość osi optycznych układu pomiarowego i celownika laserowego w kierunku pionowym

$Y_{Ti20}(l)$ oraz w kierunku poziomym $X_{Ti20}(l)$. Wyłączyć wskaźnik laserowy. Podczas pomiarów **nie rejestrować** obrazów termicznych.

c) Obliczyć według wzorów (18), (19) błędy równoległości osi optycznych układu pomiarowego i celownika laserowego w kierunku pionowym α_{Yi20} i poziomym α_{Xi20} . Wyniki zapisać do tabeli 5. Zasadę obliczeń analogicznych jak dla pirometru 561 przedstawia rys.21.

5.8. Wyznaczanie współczynnika odległościowego kamery termowizyjnej Ti20

a) Założyć na ekran termiczny kołowego źródła ciepła (pozostawić po poprzednim punkcie) dodatkową przesłonę z otworem o średnicy $D=20\text{mm}$. Zmierzyć i zanotować w tabeli 6 średnicę D otworu w przesłonie. Z danych technicznych zapisać do tabeli 6 wartość błędu granicznego pirometru (*ang. Accuracy*).

b) Obserwując obraz termowizyjny utrzymywać oś optyczną kamery termowizyjnej Ti20 nakierowaną na środek kołowego źródła ciepła i wykonać serię 11 pomiarów temperatury t (w $^{\circ}\text{C}$) kołowego źródła ciepła. Odległość l kamery termowizyjnej Ti20 od ekranu termicznego zmieniać równomiernie od zera do 3metrów. Wyniki zapisywać w tabeli 6. Podczas pomiarów **nie rejestrować** obrazów termicznych.

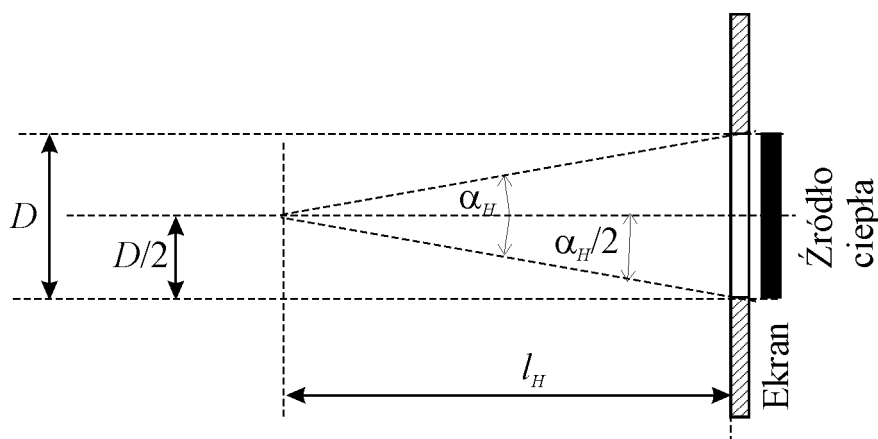
c) Przedstawić na wykresie zależność wyniku pomiaru temperatury t od stosunku odległości do średnicy l/D . Odczytać z wykresu i zapisać do tabeli 6 współczynnik odległościowy $l:D$ kamery termowizyjnej Ti20, dla którego wynik pomiaru nie zależy od odległości, a błąd pomiaru temperatury Δt liczony względem pierwszego pomiaru nie przekracza wartości błędu granicznego (*Accuracy*). Zasadę wyznaczania współczynnika odległościowego zilustrowano na rys.22.

d) Odczytać z dokumentacji kamery termowizyjnej Ti20 i zapisać do tabeli 6 współczynnik odległościowy (*Optical Resolution*) $D:S$ (*Distance:Spot Size*).

5.9. Wyznaczanie pola widzenia kamery termowizyjnej Ti20

a) Usunąć z ekranu termicznego dodatkowe przesłony. Zmierzyć i zanotować w tabeli 7 średnicę D otworu w ekranie termicznym. Odczytać z dokumentacji kamery termowizyjnej Ti20 i zanotować w tabeli 7 rozmiar pola widzenia FOV (*Field of View*).

b) Obserwując obraz termowizyjny utrzymywać oś optyczną kamery termowizyjnej Ti20 nakierowaną na środek kołowego źródła ciepła. Ustalić odległość l_H kamery termowizyjnej Ti20 od ekranu termicznego, przy której obraz otworu w ekranie termicznym wypełni całą **szerokość** ekranu kamery. Zarejestrować otrzymany obraz termiczny. Wynik pomiaru l_H zapisać w tabeli 7. Obliczyć według wzoru (21) kąt α_H pola widzenia kamery w kierunku poziomym.



Rys. 23. Zasada wyznaczania współczynnika pola widzenia FOV kamery termowizyjnej

c) Podobnie jak w punkcie b), ustalić odległość l_V kamery termowizyjnej Ti20 od ekranu termicznego, przy której obraz otworu w ekranie termicznym wypełni całą **wysokość** ekranu kamery. Zarejestrować otrzymany obraz termiczny. Wynik pomiaru l_V zapisać w tabeli 7. Obliczyć według wzoru (21) kąt α_V pola widzenia kamery w kierunku pionowym. Zasadę wyznaczania współczynnika pola widzenia kamery termowizyjnej przedstawiono na Rys.23.

5.10. Ocena współczynnika emisyjności za pomocą kamery termowizyjnej Ti20

a) Postępując według punktu 5.5 przygotować pirometr 651 do pomiaru temperatury na powierzchni grzejnika olejowego z naklejoną czarną folią PCV. Sprawdzić ustawienie współczynnika emisyjności ε w pirometrze 561 i w kamerze Ti20 i ewentualnie skorygować ustawienie na $\varepsilon_{561}=\varepsilon_{Ti20}=0,95$. Obserwując obraz z kamery termowizyjnej Ti20 nakierowanej na grzejnik olejowy zmierzyć temperaturę t_{Ti20} na powierzchni z naklejoną czarną PCV. Wykonać pomiar temperatury pirometrem t_{PIR} (wyświetlacz główny pirometru) i termoparą t_{TP} (wyświetlacz dodatkowy pirometru). Wyniki pomiarów zapisać w tabeli 8.

b) Powtórzyć pomiary z punktu a) dla folii aluminiowej oraz dla powierzchni grzejnika pokrytej fabrycznie farbą. Wyniki pomiarów zapisać w kolejnych wierszach tabeli 8.

5.11. Rejestracja obrazów termicznych za pomocą kamery Ti20

a) Odczytać i zanotować do tabeli 9: datę i godzinę wskazywaną przez kamerę termowizyjną oraz aktualną datę i godzinę w chwili rozpoczęcia rejestracji obrazów termowizyjnych, tryb pracy kamery (Auto/Manual), współczynnik emisyjności ε , ustawienia kompensacji RTC.

b) Zarejestrować w pamięci kamery termowizyjnej i opisać w protokole (tabela 9) obrazy następujących obiektów (jeden wybrany lub więcej zależnie od dostępnego czasu):

- kołowe źródło ciepła łącznie z ekranem termicznym,
- grzejnik olejowy od strony naklejonych folii do badania emisyjności,
- twarz jednego z członków zespołu ćwiczeniowego,
- ślad termiczny ręki ludzkiej pozostawiony po około 1 minucie na powierzchni słabo przewodzącej ciepło,
- jeden lub więcej dowolnie wybranych obiektów znajdujących się w laboratorium.

5.12. Przygotowanie raportu z badań termowizyjnych

a) Uruchomić komputer PC i program InsideIR do analizy obrazów termicznych. Korzystając z instrukcji obsługi programu zapoznać się ze strukturą menu programu InsideIR.

b) Dołączyć kamerę Ti20 do złącza USB komputera i skopiować obrazy termiczne z pamięci kamery na dysk twardy komputera. Wyeksportować zarejestrowane obrazy termiczne do plików graficznych.

c) Przygotować raport (lub kilka raportów, zależnie od dostępnego czasu) zawierający wybrany obraz termiczny zarejestrowany podczas ćwiczenia.

d) Dla wybranych obrazów termicznych wykonać histogram oraz analizę profilu temperatury w przekroju pionowym i poziomym, wyeksportować otrzymane obrazy do plików graficznych i dołączyć do raportu.

e) Wyeksportować przygotowany raport do pliku pdf.

f) Skopiować wszystkie wygenerowane pliki z dysku komputera na nośnik do wykorzystania w sprawozdaniu.

g) Skasować obrazy termiczne z pamięci kamery termowizyjnej Ti20.

5.13. Opracowanie wyników i przygotowanie sprawozdania

W sprawozdaniu należy zamieścić wyniki otrzymanych wyników pomiarów oraz przeprowadzonych obliczeń, zgodnie z opisem zamieszczonym w punktach 5.3 ... 5.12. Do sprawozdania należy dołączyć raport przygotowany w programie InsideIR oraz uzyskane obrazy termiczne. We wnioskach końcowych sprawozdania należy zestawić wartości parametrów pirometru i kamery termowizyjnej otrzymane w pomiarach i odczytane z dokumentacji technicznej.

5.14 Tabele i wzory obliczeniowe

Tabela 1. Badanie wskaźnika laserowego pirometru 561

Godzina załączenia źródeł ciepła (hh:mm):									
lp	a	b	l	$Y_{561}(l)$	$X_{561}(l)$	ΔY_{561}	ΔX_{561}	$\alpha_{Y_{561}}$	$\alpha_{X_{561}}$
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	stopnie	stopnie
1			0						
2									

Tabela 2. Wyznaczanie współczynnika odległościowego pirometru 561

Y ₅₆₁ = mm				
D= mm Accuracy= °C				
lp	l	t	Δt	l/D
	mm	°C	°C	mm/mm
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
l:D = mm:mm				
D:S = mm:mm				

Tabela 3. Wyznaczanie współczynnika emisyjności ϵ za pomocą pirometru 561

$Y_{561} =$ mm					$l:D =$ mm/mm						
lp	Opis powierzchni emitującej promieniowanie	c	d	l_{max}	l_{pom}	M_{ust}	ϵ_{licz}	t_{PIR}	t_{TP}	Δt_{ϵ}	ϵ_{opt}
		mm	mm	mm		mm	-	-	°C	°C	°C
1						LO					
2						MED.					
3						HI					
4						LO					
5						MED.					
6						HI					
7						LO					
8						MED.					
9						HI					

Tabela 4. Badanie powtarzalności wyników pomiarów pirometrem 561

$Y_{561} =$ mm		$\epsilon_{opt} =$							
$c =$ mm		$d =$ mm			$l:D =$ mm/mm				
$l_{max} =$ mm		$l_{pom} =$ mm							
lp	t_{PIR}	$t_{PIR} \acute{s}r$	σt_{PIR}	$3\sigma t_{PIR}$	t_{TP}	$t_{TP} \acute{s}r$	σt_{TP}	$3\sigma t_{TP}$	
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									

Tabela 5. Badanie wskaźnika laserowego kamery termowizyjnej Ti20

lp	a	b	l	$Y_{Ti20}(l)$	$X_{Ti20}(l)$	ΔY_{Ti20}	ΔX_{Ti20}	αY_{Ti20}	αX_{Ti20}
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	stopnie	stopnie
1			0						
2									

Tabela 6. Wyznaczanie współczynnika odległościowego kamery termowizyjnej Ti20

D= mm Accuracy= °C				
lp	l	t	Δt	l/D
	mm	°C	°C	mm/mm
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
l:D = mm:mm				
D:S = mm:mm				

Tabela 7. Wyznaczanie pola widzenia kamery termowizyjnej Ti20

D= mm				
lp	lH	$D/2$	$\alpha H/2$	αH
	mm	mm	stopnie	stopnie
1				
	lV	$D/2$	$\alpha V/2$	αV
	mm	mm	stopnie	stopnie
2				
Field od View FOV = ° H				
Field od View FOV = ° V				

Tabela 8. Ocena współczynnika emisyjności ε za pomocą kamery termowizyjnej Ti20

$\varepsilon_{561} = 0,95$ (HI)					$\varepsilon_{Ti20} = 0,95$				
Y561 = mm					l:D = mm/mm				
lp	Opis powierzchni emitującej promieniowanie	c mm	d mm	lmax mm	lpom mm	tTi20 °C	tPIR °C	tTP °C	Wnioski
1									
2									
3									

Tabela 9. Rejestracja obrazów termicznych za pomocą kamery Ti20

$\varepsilon_{Ti20} = 0,95$			RTC = OFF	
MODE=			Laser : OFF	
Data kamery Ti20 ::			Data rzeczywista :	
Godzina kamery Ti20 :			Godzina rzeczywista :	
lp	Opis obiektu, rodzaj powierzchni itp..	numer w pamięci kamery Ti20	czas rejestracji godz : min	
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Odległość pionowa torów optycznych układu pomiarowego i wskaźnika laserowego

$$Y_{561} = b + \frac{a-b}{2} \quad (17)$$

Błędy równoległości osi optycznych układu pomiarowego i celownika laserowego:

$$\Delta Y_{561} = Y_{561}(l) - Y_{561}(0), \Delta X_{561} = X_{561}(l) - X_{561}(0) \quad (18)$$

$$\alpha_{Y561} = \arctg \frac{\Delta Y_{561}}{l}, \alpha_{X561} = \arctg \frac{\Delta X_{561}}{l} \quad (19)$$

Błąd pomiaru temperatury od współczynnika emisyjności ε :

$$\Delta t_{\varepsilon} = t_{PIR} - t_{TP} \quad (20)$$

Kąt pola widzenia FOV kamery termowizyjnej:

$$\alpha_H = 2 \arctg \frac{\frac{D}{2}}{l_H}, \alpha_V = 2 \arctg \frac{\frac{D}{2}}{l_V} \quad (21)$$

6. PYTANIA I ZAGADNIENIA KONTROLNE

- Jakie zasady bezpieczeństwa obowiązują na stanowisku pomiarowym?
- Jakie niebezpieczeństwo stwarza promieniowanie laserowe?
- W jakim zakresie długości fali mieści się promieniowanie podczerwone?
- Wyjaśnij pojęcia ciała doskonale czarnego.
- Wyjaśnij pojęcia ciała szarego.
- Wyjaśnij prawo Planca.
- Wyjaśnij prawo promieniowania Wiena.
- Wyjaśnij prawo Stefana-Boltzmana.
- Wyjaśnij prawo przesunięć Wiena.
- Wyjaśnij pojęcie współczynnika emisyjności ciała rzeczywistego i ciała szarego.
- Omów zagadnienie transmisyjności atmosfery dla promieniowania podczerwonego.
- Przedstaw rodzaje pirometrów.
- Wyjaśnij zasadę działania pirometru monochromatycznego.
- Wyjaśnij zasadę działania pirometru dwubarwowego.
- Wyjaśnij zasadę działania pirometru radiacyjnego.
- Wyjaśnij zasadę działania pirometru pasmowego.
- Omów najważniejsze parametry pirometrów.
- Przedstaw zalety pomiarów pirometrycznych.
- Jakie trudności występują podczas pomiarów z użyciem pirometrów?
- Przedstaw rodzaje kamer termowizyjnych.
- Jakie pomiary są realizowane podczas ćwiczenia?

7. LITERATURA

1. Michalski L., Eckersdorf K., Kucharski J.: Termometria. Przyrządy i metody, Politechnika Łódzka, Łódź 1998.
2. Miłek M.: Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych, Wyd. Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2006.
3. Piotrowski J. (red.): Pomiary, czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego, WNT, Warszawa 2009.
4. Romer E.: Miernictwo przemysłowe, PWN, Warszawa 1978.

Dodatkowe źródła informacji:

1. Strona internetowa producenta pirometru i kamery Fluke, <http://fluke.com.pl/>