

Ćwiczenie nr 6 Zastosowanie badań termowizyjnych w fototerapii laserowej

CEL ĆWICZENIA:

- zapoznanie z budową i obsługą kamery termowizyjnej
- pomiar stref temperaturowych podczas zabiegów laserowych,
- określenie wpływu mocy i czasu naświetlania na strefy koagulacji.

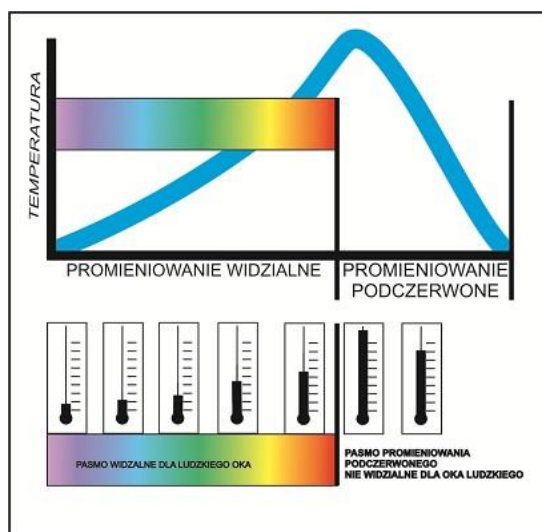
1. WPROWADZENIE TEORETYCZNE

1. KAMERA TERMOWIZYJNA

Kamera termowizyjna jest urządzeniem służącym do detekcji, rejestracji, przetwarzania i wizualizacji promieniowania podczerwonego emitowanego przez badany obiekt. Poprzez wizualizację rozkładu promieniowania podczerwonego, uzyskujemy informację o rozkładzie temperatury na powierzchni tego obiektu. Technika termowizyjna ze względu na swą nieinwazyjność oraz bezkontaktowość znalazła zastosowanie w diagnostyce medycznej. Termografia jest często badaniem uzupełniającym do stosowanych rutynowo metod diagnostycznych, ponieważ tkanki zmienione chorobowo wykazują inną temperaturę niż tkanki zdrowe.

1.1. Promieniowanie podczerwone

Promieniowanie podczerwone zostało odkryte w 1800r. przez angielskiego astronoma Sir Williama Herschela. Uczony ten, podczas poszukiwań filtra optycznego do ograniczenia jaskrawości obrazu słońca w teleskopie, testując różne próbki szkła zauważył, że niektóre przepuszczały niewielką ilość ciepła słonecznego, natomiast inne przepuszczały bardzo go dużo. Zaintrygowany tym faktem, powtórzył on doświadczenie Newtona z pryzmatem, z tą różnicą, że nie interesował go rozkład kolorów w widmie słonecznym, ale efekt cieplny. Po rozszczepieniu promieniowania słonecznego przez pryzmat Herschel ułożył wzdłuż widma słonecznego termometry rtęciowe. Służyły one, jako detektory promieniowania. Termometry pochłaniały energię promieniowania, które na nie padało. W wyniku, czego wykazały temperaturę wyższą niż otoczenia. Ilustracja doświadczenia Herschela wraz z uzyskanymi z doświadczenia wynikami pomiaru rozkładu temperatury wzdłuż widma promieniowania słonecznego przedstawiona jest na rysunku 1 [1].

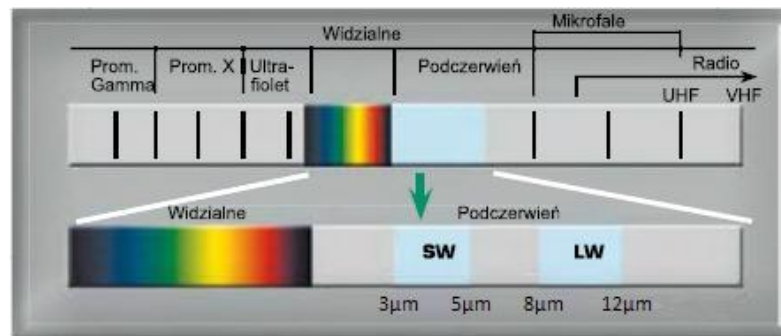


Rysunek 1: Ilustracja doświadczenia Herschela wraz z krzywą rozkładu temperatur wskazywanych przez termometry umieszczone w różnych kolorach widma [3].

W wyniku przeprowadzonego doświadczenia Herschel zauważył, że termometry umieszczone poza czerwoną granicą promieniowania widzialnego wskazywały wyższą temperaturę niż termometry umieszczone w zakresach promieniowania widzialnego. Wynikało stąd, iż widmo promieniowania słonecznego nie pokrywa się z granicami promieniowania widzialnego. Kolejnym wnioskiem był fakt, iż bezpośrednio z obszarem czerwieni łączył się obszar nieznanego dotąd, niewidzialnego promieniowania. Herschel nazwał to promieniowanie „ciemnym ciepłem” lub „promieniami niewidzialnymi”. Było to właśnie promieniowanie podczerwone [1].

Promieniowanie podczerwone, zwane często ze względu na swe właściwości promieniowaniem cieplnym, obejmuje zakres widma fal elektromagnetycznych między $0,78\mu\text{m}$ a 1mm , czyli długości fal leżące między promieniowaniem widzialnym a falami radiowymi. Podział promieniowania występującego w przyrodzie prezentuje rysunek 2 [4]. Podział promieniowania podczerwonego na podzakresy jest umowny. W zależności od źródła można je podzielić na różne podzakresy. Zgodnie z podziałem przedstawionym przez dr Grzegorza Rudowskiego [5] promieniowanie podczerwone można podzielić na następujące podzakresy:

- Krótkofalowe (bliska podczerwień) – od $0,78\ \mu\text{m}$ do $1,4\ \mu\text{m}$
- Średnifalowe (średnia podczerwień) – od $1,4\ \mu\text{m}$ do $3\ \mu\text{m}$
- Długofalowe (daleka podczerwień) – od $3\ \mu\text{m}$ do $1\ \text{mm}$



Rysunek 1: Podział promieniowania występującego w przyrodzie [4].

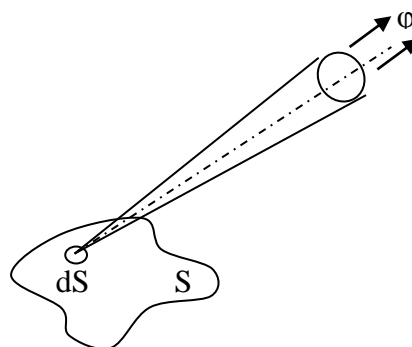
W termowizji pracuje się zwykle w zakresie dalekiej podczerwieni. Najczęściej wykorzystuje się następujące przedziały długości fal:

- od $3\mu\text{m}$ do $5\mu\text{m}$ (termowizory krótkofalowe)
- od $8\mu\text{m}$ do $13\mu\text{m}$ (termowizory długofalowe)

Podział ten jest związany z właściwościami emisyjnymi badanych obiektów oraz faktem, iż promieniowanie podczerwone jest dobrze przepuszczane (transmitowane) przez atmosferę w tych właśnie przedziałach.

Każde ciało o temperaturze wyższej od zera bezwzględnego ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ lub $0\text{ }^{\circ}\text{K}$) jest źródłem promieniowania podczerwonego. Promieniowanie to powstaje w wyniku ruchu drgającego i obrotowego cząstek materii takich jak atomy, cząsteczki czy jony. W życiu codziennym człowiek spotyka się z podczerwienią nieustannie. Ciepło odczuwane od słońca, kaloryfera czy od nas samych to właśnie promieniowanie podczerwone. Nawet przedmioty uważane przez człowieka, jako bardzo zimne – jak np. kostki lodu – także emitują promieniowanie podczerwone. Chociaż promieniowanie to jest niewidoczne dla ludzkich oczu jest odczuwane przez zakończenia nerwowe skóry, jako ciepło. Im cieplejszy obiekt, tym więcej promieniowania podczerwonego emituje [4].

W opisie promieniowania podczerwonego i analizie urządzeń termowizyjnych często stosuje się wielkość radiometryczną, jaką jest emitancja. Emitancję lub egzytancję energetyczną można zdefiniować, jako gęstość powierzchniową strumienia energii promieniowania Φ z powierzchni S do półprzestrzeni, co pokazano na rysunku 3. Czasami wielkość tą nazywa się gęstością strumienia emisji. Wyraża się ją za pomocą wzoru 1.1 [1].



Rysunek 3: Ilustracja wielkości w definicji emitancji z powierzchni dS [1].

$$M = \frac{d\phi}{dS} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1.1)$$

Jeżeli emitancję odniesiemy do elementarnego przedziału widma, uzyskamy wtedy gęstość widmową egzytancję. Można ją wyrazić za pomocą wzoru 1.2.

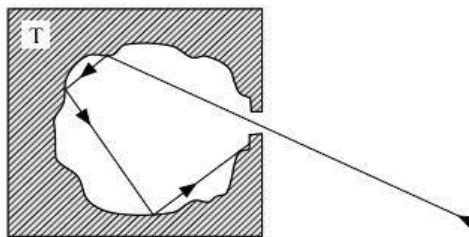
$$M_\lambda = \frac{dM}{d\lambda} \left[\frac{W}{m^2 \cdot \mu m} \right] \quad (1.2)$$

W celu łatwiejszego zrozumienia praw rządzących promieniowaniem podczerwonym wprowadzono pojęcie „ciała doskonale czarnego”.

1.2. Promieniowanie ciała doskonale czarnego

Ciałem doskonale czarnym nazwano wyidealizowane ciało całkowicie pochłaniające padające na nie promieniowanie. Nie ważna, przy czym jest długość fali promieniowania, jego kąt padania czy temperatura obiektu emitującego promieniowanie. Tak doskonałe ciało nie istnieje w rzeczywistości, jest jednak możliwe stworzenie modeli ciała czarnego o właściwościach zbliżonych do teoretycznych [5].

Modelem ciała doskonale czarnego może być duża wnęka w nieprzezroczystym materiale z niewielkim otworem, przez który wpada promieniowanie do wnętrza wnęki i odbijając się wielokrotnie od ścianek wnęki jest niemal całkowicie pochłaniane. W rezultacie na zewnątrz może się wydostać jedynie niewielka ilość tego promieniowania. Przykładowy model ciała doskonale czarnego pokazano na rysunku 5.



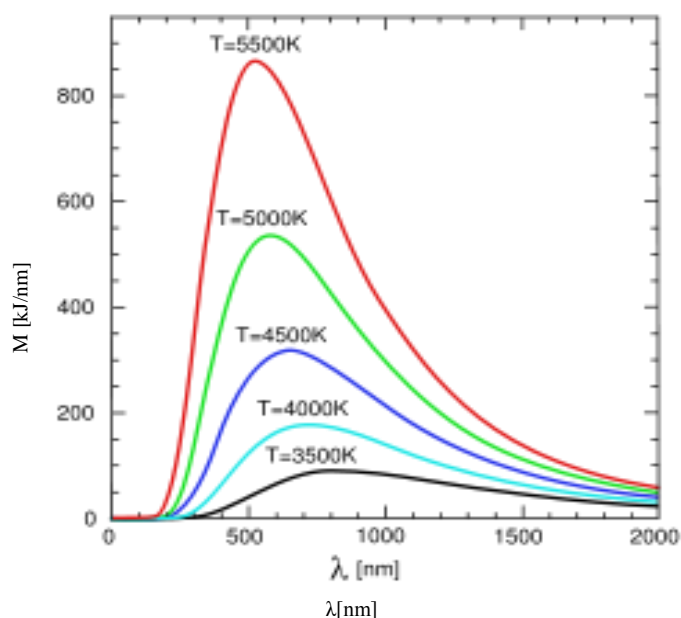
Rysunek 2: Przykładowy model ciała doskonale czarnego[6].

Widmowy rozkład promieniowania ciała czarnego, czyli gęstość widmową emitancji ciała czarnego opisał Max Planck. Wyraża się ją za pomocą wzoru Plancka (wzór 1.3).

$$M_\lambda(T) = \frac{2\pi h c_0^2}{\lambda^5 (e^{hc_0/\lambda kT} - 1)} \left[\frac{W}{m^2 \cdot \mu m} \right] \quad (1.3)$$

gdzie: h - stała Plancka $\approx 6,26 \cdot 10^{-34}$ [J·s],
 k - stała Boltzmana $\approx 1,381 \cdot 10^{-23}$ [J/K],
 T - temperatura bezwzględna ciała czarnego,
 λ - długość fali [μm],
 c_0 - prędkość światła $\approx 2,99 \cdot 10^8$ [m/s],

Rysunek 5 prezentuje graficzne przedstawienie prawa Plancka dla różnej temperatury ciała czarnego, dzięki czemu znacznie łatwiej zrozumieć to prawo. Analizując wykres przedstawiony na rysunku 6 można zauważyć, iż dla każdej temperatury można wyznaczyć taką długość fali λ_{max} , dla której występuje maksimum emitancji. Widać również, że im wyższa temperatura tym dla krótszych długości fali obserwujemy maksimum emitancji.



Rysunek 5: Gęstość widmowa emitancji ciała doskonale czarnego wyrażona przez prawo Plancka [1].

Taką długość fali λ_{max} , dla której występuje maksimum emitancji określa prawo Wiena (prawo przesunięć Wiena). Wyrazić je można za pomocą wzoru 1.4.

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} [mm] \quad (1.4)$$

Dokonując odpowiednich operacji na wzorze Plancka (wzór 1.3) otrzymamy wzór opisujący całkowitą emitancję ciała doskonale czarnego. Jest to wzór Stefana-Boltzmann (wzór 1.5). Wynika z niego, iż całkowita moc emitowana przez ciało doskonale czarne jest proporcjonalna do czwartej potęgi jego temperatury bezwzględnej. W interpretacji graficznej całkowita emitancja ciała czarnego to pole pod krzywą Plancka dla danej temperatury [1].

$$M_B = \sigma T^4 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1.5)$$

gdzie: σ – stała Stefana-Boltzmana = $5,66943 \cdot 10^{-8} [W/(m^2 \cdot K^4)]$

1.3. Promieniowanie ciał rzeczywistych

Ciało doskonale czarne jest przypadkiem ciała wyidealizowanego. W rzeczywistości promieniowanie ciał jest inne niż promieniowanie ciała doskonale czarnego. Na skutek zachodzących zjawisk absorpcji, odbicia czy transmisji gęstość mocy promieniowania ciał rzeczywistych jest mniejsza niż ciała czarnego.

W celu porównania promieniowania ciała rzeczywistego z promieniowaniem ciała doskonale czarnego wprowadzono pojęcie emisyjności. Emisyjnością ε_λ nazywamy stosunek gęstości widmowej emitancji ciała rzeczywistego M_λ do gęstości widmowej emitancji ciał doskonale czarnego M_{λ_c} , znajdującego się w tej samej temperaturze. Emisyjność można wyrazić za pomocą wzoru 1.6 [1].

$$\varepsilon_\lambda = \frac{M_\lambda}{M_{\lambda_c}} \quad (1.6)$$

Emisyjność ε_λ zależy od rodzaju ciała, jego temperatury, długości fali promieniowania oraz stanu powierzchni (polerowana, matowa) i waha się w granicach od 0,02 dla polerowanej powierzchni złotej do 0,98 dla skóry ludzkiej.

W zależności od właściwości emisyjnych ciał można je podzielić na następujące grupy:

- ciało czarne, dla którego $\varepsilon_\lambda=1$,
- ciało szare, dla którego $\varepsilon_\lambda=\text{const}<1$,
- ciało promieniujące selektywnie, dla którego ε zależy od długości fali.

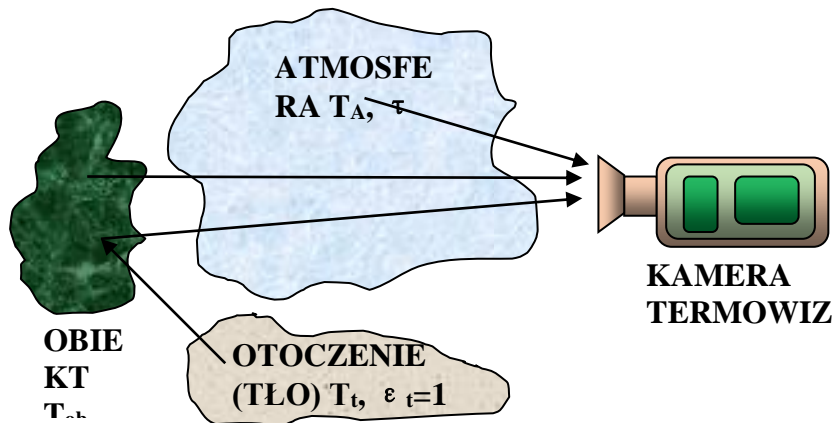
1.4. Zjawiska wpływające na pomiary temperatury

Termowizja polega na wykrywaniu nawet najmniejszej różnicy temperatur, następnie różnice te konwertowane są na obraz, który wyświetlany jest w czasie rzeczywistym na monitorze. W przeciwieństwie do innych noktowizyjnych systemów, które potrzebują odrobiny światła by wygenerować obraz, kamera termowizyjna nie potrzebuje go wcale, co czyni ją doskonałym narzędziem by zobaczyć wszystko pomimo absolutnej ciemności czy trudnych warunków atmosferycznych.

Niestety do kamery termowizyjnej dociera nie tylko promieniowanie pochodzące od badanego obiektu. Kamera termowizyjna rejestruje także promieniowanie pochodzące z otoczenia, obite od powierzchni obiektu. Zarówno promieniowanie pochodzące od obiektu jak to pochodzące z otoczenia są w pewnym stopniu tłumione przez atmosferę. Oprócz tego do kamery dociera również promieniowanie emitowane przez atmosferę. Schemat promieniowania docierającego do kamery prezentuje rysunek 6. Wszystkie te czynniki wpływają na zwiększenie błędów pomiarowych i mogą spowodować otrzymanie zafałszowanego rozkładu temperatury na powierzchni badanego ciała. Dla uzyskania dokładnych pomiarów niezbędne jest skompensowanie wpływu tych zakłócających źródeł promieniowania. Kompensacja taka jest możliwa poprzez wprowadzenie do kamery takich danych jak [1]:

- emisyjność obiektu,
- temperatura otoczenia,

- względna wilgotność atmosfery,
- odległość między badanym obiektem a kamerą,

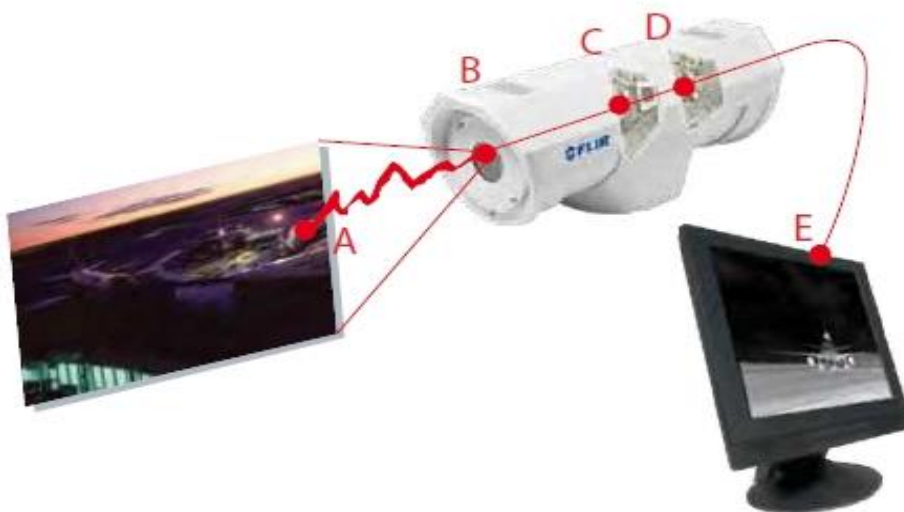


Rysunek 6: Schemat rodzajów promieniowania docierającego do kamery termowizyjnej [1].

Wprowadzenie tych danych powoduje przeprowadzenie przez kamerę automatycznej kompensacji zakłóceń, co prowadzi do bardziej dokładnego pomiaru.

1.5. Budowa kamery termowizyjnej

Rysunek numer 7 przedstawia schemat działania kamery termowizyjnej. Promieniowanie emitowane przez badany obiekt (oznaczone na rysunku jako A) jest zbierane przez obiektyw (B). Następnie obiektyw skupia je na detektorze podczerwieni (C). Ten przesyła informacje do procesora (D) w celu dalszej obróbki elektronicznej. Następnie sygnał jest przekształcany w obraz i może być oglądany na monitorze (E). Monitor może być zewnętrzny albo wbudowany w kamerę [4].



Rysunek 7: Schemat działania kamery termowizyjnej [4].

Najważniejszymi elementami funkcjonalnymi kamery termowizyjnej są obiektyw zbierający promieniowanie oraz detektor podczerwieni.

2.1. Termiczne właściwości tkanek

Gromadzenie się ciepła w tkankach spowodowane jest wyłącznie przez światło zaabsorbowane. Ciepło zgromadzone $S(r,z,t)$ wewnątrz naświetlanej tkanki można wyrazić jako iloczyn współczynnika absorpcji μ_a naświetlanej tkanki oraz natężenia światła $I(r,z,t)$, co wyraża wzór 2.9. Akumulacja ciepła $S(r,z,t)$ zależy od długości fali λ , ponieważ współczynnik absorpcji μ_a jest zależny od λ .

$$S(r,z,t) = \mu_a \cdot I(r,z,t) \quad (2.9)$$

gdzie: $S(r,z,t)$ – lokalne gromadzenie się ciepła,
 μ_a - współczynnik absorpcji naświetlanej tkanki,
 $I(r,z,t)$ – lokalne natężenie światła,

Zmiana ciepła wewnątrz tkanki o wielkość dQ powoduje liniową zmianę temperatury o dT , jeżeli w tkance nie zachodzi przemiana fazowa (parowanie lub topienie się tkanki) lub zmiana struktury tkanki (w wyniku koagulacji czy karbonizacji). Można to wyrazić za pomocą wzoru 2.10.

$$dQ = m \cdot c \cdot dT \quad (2.10)$$

gdzie: m – masa tkanki,
 c – ciepło właściwe (jego dobrym przybliżeniem jest zależność podana przez Takatę i jego współpracowników $c = \left(1,55 + 2,8 \frac{\rho_w}{\rho}\right) \left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$, gdzie ρ to masa właściwa badanej tkanki [kg/m^3], natomiast ρ_w to masa właściwa wody).

Wzór 2.9 można odnieść jedynie do zamkniętych układów fizycznych. W układach biologicznych powstają pewne straty ciepła. Wynikają one z przewodnictwa, unoszenia (np. transport spowodowany przepływem krwi) i wypromieniowania (opisane prawem Stefana-Boltzmanna - wzór 1.5).

Przewodzenie jest głównym mechanizmem odpowiadającym za transport ciepła do naświetlanych tkanek. Przewodnictwo cieplne można określić, jako przenoszenie energii, wywołane różnicą temperatur pomiędzy sąsiadującymi tkankami. Strumień ciepła j_Q jest proporcjonalny do gradientu temperatury ∇T . Można je określić równaniem dyfuzyjnym za pomocą wzoru 2.11.

$$j_Q = -k \cdot \nabla T \quad (2.11)$$

gdzie: k – współczynnik przewodnictwa cieplnego wg Takaty $\left(0,06 + 0,57 \frac{\rho_w}{\rho}\right) \left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$,

Stała termiczna dyfuzji κ wyraża dynamikę zachowania się temperatury poprzez kombinację współczynnika przewodnictwa cieplnego (k) oraz ciepła właściwego (c). Stałą

termiczną dyfuzji można zdefiniować za pomocą wzoru 2.12. Wartość κ dla wody i większości tkanek jest taka sama ($1,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$). Dzieje się tak, gdyż spadek przewodności cieplnej (spowodowany niską zawartością wody), zwykle skompensowany jest równoczesnym spadkiem pojemności cieplnej.

$$\kappa = \frac{k}{\rho \cdot c} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \quad (2.12)$$

Wielkością opisującą przestrzenny zakres przenoszenia ciepła jest głębokość penetracji termicznej z_{term} . Jest to wielkość zależna od czasu opisująca odległość, dla której temperatura zmniejsza się do wartości $1/e$ wartości maksymalnej. Można ją zdefiniować za pomocą wzoru (2.13).

$$z_{\text{term}}(t) = \sqrt{4 \cdot \kappa \cdot t} \quad (2.13)$$

gdzie: κ – stała termiczna dyfuzji,
 t – czas.

W celu zminimalizowania zasięgu strefy uszkodzenia zdrowej tkanki podczas termicznego zniszczenia tkanki ważne jest dobranie odpowiedniego czasu trwania impulsu laserowego. Parametrem wpływającym na czas naświetlania jest czas relaksacji termicznej τ_{term} . Można go wyznaczyć poprzez porównanie stałej termicznej dyfuzji κ oraz głębokości penetracji optycznej δ , co prezentuje wzór 2.14.

$$\delta = \sqrt{4 \cdot \kappa \cdot \tau_{\text{term}}} \quad (2.14)$$

Czas relaksacji termicznej w sensie fizycznym traktować można, jako podatność termiczną tkanki. Przyjmuje się, że dla $\tau < \tau_{\text{term}}$ ciepło nie dyfunduje na głębokość penetracji optycznej. W takim przypadku zniszczenie tkanki jest minimalne. Natomiast dla $\tau > \tau_{\text{term}}$ zniszczenie tkanki otaczającej rejon naświetlania jest duże, gdyż ciepło może dyfundować na wielokrotność odległości penetracji optycznej. Parametr ten zależny jest od długości fali padającego promieniowania.

2. UKŁAD POMIAROWY

Zadaniem Studentów będzie rejestracja obrazów termowizyjnych zabiegów z zastosowaniem lasera koagulacyjnego.

Realizacja ćwiczenia wymaga zastosowania następującego specjalistycznego sprzętu , a także programów graficznych:

- ❖ Kamera termowizyjna FLIR E6
- ❖ Fotokoagulator laserowy LS FL 1000/08 firmy Laser Secure, emitujący promieniowanie o długości fali $\lambda = 810nm$
- ❖ Kostki żelatynowe imitujące tkankę biologiczną
- ❖ Program Flir Quick Report 1.2 SP2

UWAGA: W czasie konstrukcji pomiarów należy zachować szczególną ostrożność i nie kierować promieniowania laserowego w kierunku oczu i kamery.

3. PRZEBIEG ĆWICZENIA

3.1. Przygotowanie próbek żelatynowych

Żelatyna jest substancją naturalną będącą mieszaniną białek i peptydów. Pozyskuje się ją na drodze częściowej hydrolizy kolagenu, który zawierają skóra, chrząstki oraz kości zwierzęce. Rozpuszczona w wodzie tworzy układ koloidalny, łatwo przechodzący w żel w odpowiednio niskiej temperaturze. Temperatura topnienia żelatyny i przejścia żelu w zol to $40^{\circ}C$.

Próbki wykorzystane do badań otrzymano z roztworu żelatyny w stosunku 50g żelatyny na jeden litr wody. Otrzymaną w ten sposób żelatynę należy pokroić na prostopadłościany o długości krawędzi $3cm \times 3cm \times 4cm$.

3.2. Przeprowadzenie pomiarów

Umieścić aplikator światłowodowy w próbce żelatyny ok. 0,5 cm od krawędzi. Ustawić parametry promieniowania wg załączonej poniżej tabeli. Wykonywać zdjęcia termowizyjne co 20 s. Po wykonanym zabiegu zmierzyć strefę zniszczenia i zrobić zdjęcie.

Tabela pomiarowa

Moc\czas	30 s	60 s	2 min
1,5 W			
2 W			
2,5 W			
3 W			
3,5 W			

4. OPRACOWANIE WYNIKÓW

W sprawozdaniu należy umieścić wyniki wszystkich przeprowadzonych zadań pomiarowych oraz odpowiednio je skomentować. Należy również załączyć i podpisać wszystkie zarejestrowane obrazy. W sprawozdaniu należy umieścić tabelę z maksymalnymi temperaturami dla wszystkich pomiarów. Wykonać wykresy zależności max T od zastosowanej mocy i czasu naświetlania.

Opracowała: dr inż. Iwona Hołowacz

Katedra Inżynierii Biomedycznej Wydziału PPT Politechniki Wrocławskiej

Literatura

[1] Pomiary termowizyjne w praktyce : praca zbiorowa pod red H.Madury, Warszawa : Agenda Wydawnicza PAKu, 2004

[2] Strona internetowa Creation Revolution. <http://creationrevolution.com/2011/06/sir-william-herschel-father-of-modern-astronomy/>.

[3] Strona internetowa grupy szkoleniowej I.C.C. <http://icc-szkolenia.pl/Historia-termowizji.php>.

[4] Strona internetowa producentów kamer termowizyjnych FLIR. <http://www.flir.linc.pl/Termowizja.html>.

[5] dr G.Rudowski: Termowizja i jej zastosowanie, Warszawa : Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1978.

[6] Encyklopedia internetowa Edupedia. http://www.edupedia.pl/words/index/show/532544_sloownik_fizyczny-ciao_doskonale_czarne.html.