

Mgr inż. Monika PIWIŃSKA

Dr inż. Robert ZAREMBA

Samodzielny Zakład Techniki w Żywieniu, Wydział Nauk o Żywieniu Człowieka i Konsumpcji
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

MONITOROWANIE I KONTROLA TEMPERATURY W PRZEMYŚLE SPOŻYWCZYM Z WYKORZYSTANIEM PROMIENIOWANIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO W ZAKRESIE PODCZERWIENI®

Monitoring and temperature control in the food industry with the use
of electromagnetic radiation in the infrared range®

Słowa kluczowe: Termowizja, termografia podczerwieni, pomiar temperatury.

Obecnie w przemyśle spożywczym poszukuje się innowacyjnych rozwiązań z zakresu monitorowania i kontroli prawidłowości przebiegu procesów produkcyjnych. Nowoczesne techniki powinny charakteryzować się niezawodnością, prostotą obsługi, dokładnością, krótkim czasem detekcji oraz nieinwazyjnością. Wśród tych metod wyróżnić można termowizję, która w sposób bezkontaktowy pozwala na zdalne rejestrowanie rozkładu temperatury na powierzchni badanego obiektu w czasie rzeczywistym.

W artykule omówiono podstawy teoretyczne termografii podczerwieni oraz dokonano przeglądu zastosowania techniki termowizyjnej w przemyśle spożywczym.

Key words: infrared, infrared thermography, thermovision, temperature measurement.

Nowadays, the food industry is seeking for innovative technological solutions in the field of monitoring and controlling the production processes. Modern techniques should be characterized by reliability, ease of use, accuracy, short detection time and non-invasiveness. Among these methods, infrared thermovision could be distinguished. The thermovision technique allows contactless, remote measurement of objects surface temperature distribution in real time.

The article discusses the theoretical basis of infrared thermovision and reviews the use of infrared technology in the food industry.

WPROWADZENIE

Jednym z najważniejszych parametrów wielu procesów przemysłowych jest temperatura, której monitorowanie pozwala ocenić poprawność przebiegu danego procesu. Do kontroli temperatury na ogół wykorzystywane są techniki wymagające bezpośredniego kontaktu z badanym obiektem, wyznaczające wartość temperatury w określonych punktach. Pomiaru te prowadzone są przy użyciu termometrów, termopar oraz termistorów. Z uwagi na inwazyjny charakter tradycyjnych metod coraz większą rolę w przemyśle odgrywają nowoczesne, bezkontaktowe techniki pomiaru temperatury takie jak termografia podczerwieni, pozwalająca na określenie powierzchniowego pola temperatury na podstawie detekcji podczerwonego promieniowania emitowanego przez daną powierzchnię [16, 20].

Termografia podczerwieni, zwana również termowizją jest techniką przetwarzania obrazu polegającą na przekształcaniu promieniowania termicznego, rejestrowanej przez kamerę termowizyjną, w obraz termograficzny – termogram, stanowiący graficzne przedstawienie rozkładu temperatury na badanej powierzchni [21].

Technika termowizyjna znajduje obecnie zastosowanie w energetyce, budownictwie, hutnictwie, medycynie, a także

w badaniach naukowych umożliwiając uzyskanie informacji o zjawiskach termodynamicznych i wymianie ciepła. O wysokiej użyteczności pomiarów z wykorzystaniem kamery termowizyjnej decyduje brak konieczności bezpośredniego kontaktu z badanym obiektem, mobilność oraz wygoda użycia, a także możliwość cyfrowego przetwarzania informacji [1, 3, 7]. Termowizja może znaleźć zastosowanie w wielu procesach przemysłowych, także w przemyśle rolno-spożywczym, gdzie ciepło jest generowane i tracone w czasie i przestrzeni [8].

Z uwagi na szereg zalet techniki termowizyjnej oraz rosnące zainteresowanie jakością produktów żywnościowych ze strony producentów coraz częściej prowadzone są badania nad możliwością zastosowania termografii w przemyśle rolno-spożywczym. Badania dotyczą m.in.: określania fizjologicznych cech produktów roślinnych – uwzględniając charakterystyki cieplne; kontroli procesów przechowywania owoców; wykrywania uszkodzeń mechanicznych oraz oceny jakości powierzchni surowców spożywczych [4, 21]. Wśród możliwości wykorzystania termografii wymienić można także wykrywanie stresu wodnego roślin, kontrolę dojrzałości oraz jakości produktów pochodzenia roślinnego, a także kontrolę temperatury warunków przechowywania [2, 9]. Kamera termowizyjna może również zostać wykorzystana

do kontroli procesu pakowania i stanu opakowań oraz do wykrywania ciał obcych w produktach spożywczych [6, 11]. Ponadto wraz ze wzrostem zapotrzebowania na żywność typu ready-to-eat, szczególnie pochodzenia zwierzęcego, rośnie konieczność kontroli temperatury produktów na linii produkcyjnej [23]. Z uwagi na fakt, iż brakuje metod pomiaru temperatury produktów spożywczych na linii produkcyjnej, które nie wymagają bezpośredniego kontaktu z mierzoną powierzchnią, konieczna jest implementacja technik pozwalających na nieinwazyjny pomiar temperatury produktów [10].

Technika termowizyjna nie wymaga kontaktu z produktem, dzięki czemu może znaleźć zastosowanie jako precyzyjna i nieinwazyjna metoda pomiaru temperatury produktów spożywczych, nie stwarzająca zagrożenia kontaminacji żywności [12].

Celem artykułu jest omówienie podstaw teoretycznych termografii podczerwieni oraz dokonanie przeglądu stosowanych technik termowizyjnych w przemyśle spożywczym.

PODSTAWY TEORETYCZNE POMIARÓW TERMOWIZYJNYCH

Każde ciało o temperaturze wyższej od 0° K (-273,15°C), czyli zera absolutnego, emituje promieniowanie elektromagnetyczne, zwane promieniowaniem termicznym lub ciepłym [14]. Widmo promieniowania zależne jest od wartości temperatury emitera – dla temperatur poniżej 700°C mieści się w zakresie promieniowania podczerwonego i mikrofal. Jeżeli moc emitowanego przez ciało promieniowania przewyższa moc promieniowania przez nie absorbowanego następuje zjawisko stygnięcia [17]. Rozważany układ dąży do uzyskania równowagi termicznej pomiędzy ciałem a obiektem, czyli stanu gdzie moc emitowanego promieniowania będzie równa mocy absorbowanego promieniowania [15, 17].

Zgodnie z prawem Stefana-Boltzmann'a całkowita ilość emitowanego przez obiekt promieniowania na jednostkę powierzchni jest bezpośrednio związana z emisyjnością danego obiektu oraz jego temperaturą:

$$E = \sigma \varepsilon T^4 \quad (1)$$

gdzie: E – całkowita ilość emitowanego przez obiekt promieniowania na jednostkę powierzchni [W m⁻²]

σ – stała Stefana-Boltzmann'a = 5,67×10⁻⁸ [W m⁻² K⁻⁴]

ε – emisyjność obiektu [-]

T – temperatura obiektu [K].

Zatem, bazując na prawie Stefana-Boltzmann'a, jeżeli całkowita ilość wyemitowanego promieniowania i emisyjność materiału są znane, jego temperatura może zostać obliczona, co wykorzystywane jest w pomiarach termowizyjnych [13].

Zgodnie z prawem Kirchoffa stosunek zdolności emisyjnej (energia fali elektromagnetycznej emitowanej w jednostce czasu przez jednostkę powierzchni ciała ogrzanego do temperatury T) do zdolności absorpcyjnej (pochłonięta część energii promieniowania elektromagnetycznego o długości

fali od λ do $\lambda + d\lambda$, padająca na jednostkę powierzchni w jednostce czasu) każdego ciała zależy wyłącznie od długości fali oraz temperatury [16, 17]:

$$\frac{E(\lambda T)}{A(\lambda T)} = g(\lambda T) \quad (2)$$

Współczynnik emisyjności ε_λ definiowany jest jako iloraz wyemitowanej przez dane ciało energii do energii wyemitowanej przez ciało doskonale czarne (o tej samej temperaturze), a jego wartość jest mniejsza od jedności [7]. Wartość współczynnika emisyjności jest zależna od rodzaju danego materiału, jego powierzchni, temperatury materiału, długości fali obserwacji, a także kąta obserwacji. Analogiczną wartość do współczynnika emisyjności przyjmuje współczynnik absorpcji α_λ , określający jaka część energii promieniowania padającego na powierzchnię zostaje pochłonięta. W przypadku ciał rzeczywistych poza emisją oraz absorpcją promieniowania występuje również zjawisko transmisji (τ_λ) oraz odbicia (ρ_λ). Zgodnie z równaniami Kirchoffa:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \text{ oraz } \varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda \quad (3)$$

suma współczynników absorpcji, transmisji oraz odbicia jest równa jedności [13, 24]. W przypadku obiektów nieprzezroczystych pomija się współczynnik transmisji (τ_λ), a powyższe równanie uprościć można do postaci:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (4)$$

Z powyższego wynika, iż w praktyce termograficznej w dochodzącej do odbiorcy wiązkę promieniowania znajduje się nie tylko składowa promieniowania emitowanego, lecz również odbitego stanowiącego zakłócenie pomiaru [15]. Z uwagi na znaczącą ilość aspektów wpływających na wynik pomiaru termowizyjnego, istotne jest zrozumienie przyczyn powstawania błędów oraz zapobieżenie ich wystąpieniu. Niedokładności pomiarów z wykorzystaniem kamery termowizyjnej są widoczne przede wszystkim w przypadku pomiaru pola temperatury dla niejednorodnych obiektów, a więc materiałów o różnej emisyjności.

ZASTOSOWANIE METOD TERMOWIZYJNYCH W PRZEMYŚLE SPOŻYWCZYM

Pomiary temperatury stanowią ważny aspekt w procesach przemysłowych. Pomiary te są na ogół wykonywane przy użyciu termometrów, termopar oraz termistorów. Wymienione instrumenty pomiarowe wyznaczają wartość temperatury w określonych punktach, a w przypadku większości z nich konieczny jest kontakt z badanym materiałem. Termografia w podczerwieni jest bezkontaktowa, umożliwia zatem zrewolucjonizowanie koncepcji wykonywania pomiarów temperatury w procesach przemysłowych [20].

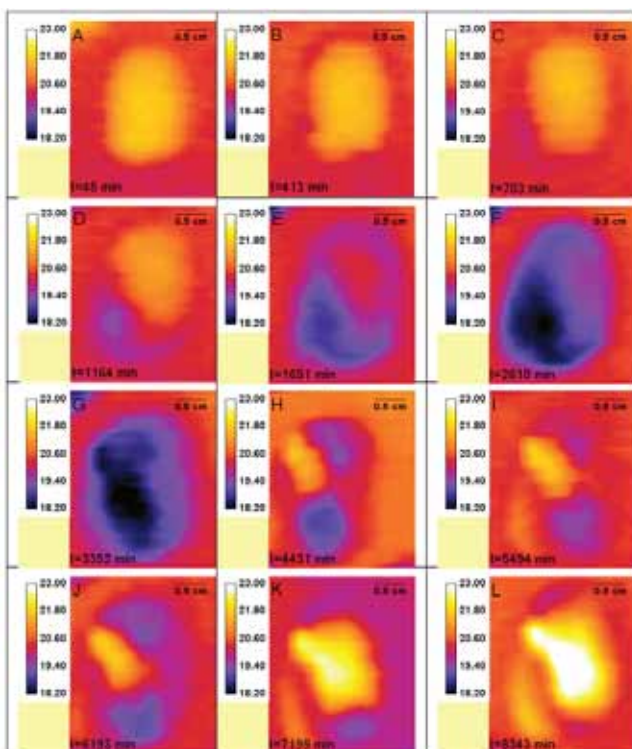
Rosnące zainteresowanie jakością produktów żywnościowych ze strony producentów sprzyja rozwojowi nowoczesnych metod kontroli jakości. Z uwagi na nieinwazyjność, krótki czas detekcji, prostotę obsługi systemu, a także zdolność detekcji poruszających się na linii produkcyjnej

obiektów, coraz częściej prowadzone są badania nad możliwością zastosowania termografii w przemyśle spożywczym [3].

Badania jakościowe produktów roślinnych

Prowadzone w ostatnich latach badania dotyczą między innymi określania fizjologicznych cech produktów roślinnych wraz z uwzględnieniem charakterystyk cieplnych np. zdolności do kiełkowania nasion roślin strączkowych. Powszechnie wśród stosowanych metod wymienić można obserwację nasion w czasie pęcznienia oraz kiełkowania, a także badania biochemiczne zachodzących zmian. Z uwagi na czasochłonność oraz wymaganą ilość materiału badawczego w literaturze pojawiły się próby zautomatyzowania metod badawczych oceny zdolności kiełkowania nasion. Baranowski i wsp. [2] podjęli próbę przeprowadzenia oceny zdolności kiełkowania nasion w oparciu o ich analizę termiczną. Celem badań było określenie zmian rozkładu temperatury radiacyjnej na powierzchni nasion o zróżnicowanej zdolności kiełkowania w czasie. Analiza termogramów wykazała odmienne rozkłady radiacyjnej temperatury nasion posiadających zdolność do kiełkowania (rys. 1) i nie mających takich zdolności (rys. 2). Zaobserwowano znacznie mniejszy spadek temperatury radiacyjnej w przypadku nasion niezdolnych do wytworzenia kielka niż w przypadku nasion kiełkujących. Ponadto wykazano mniejsze zróżnicowanie w obrębie powierzchni nasion niekiełkujących, w przypadku których trudno wyróżnić obszary o wyraźnie mniejszej lub większej wartości temperatury radiacyjnej.

Technika termograficzna okazała się użyteczna w kontroli procesów przechowywania owoców, a także przy wy-

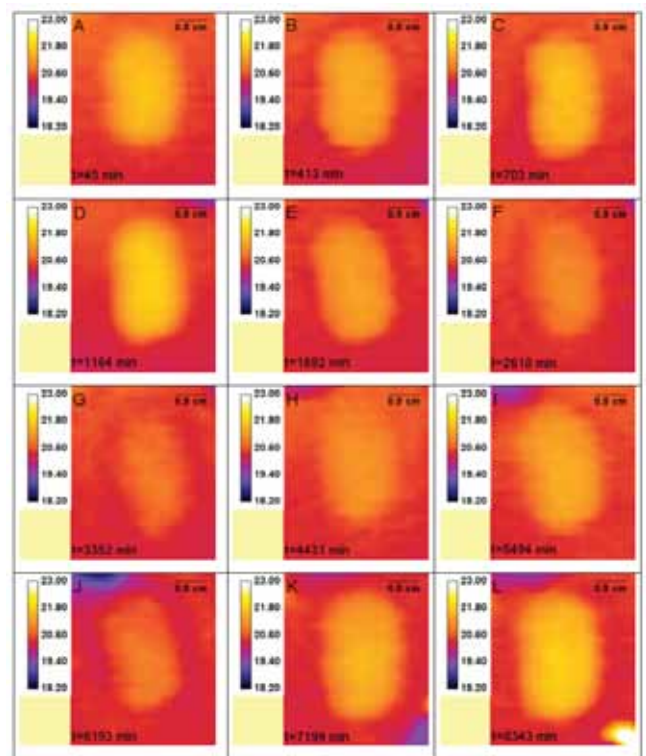


Rys. 1. Termogramy powierzchni zdrowych nasion fasoli wielokwiatowej odmiany „Eureka” w kolejnych stadiach procesu kiełkowania [2].

Fig. 1. Thermograms of the surface of healthy „Eureka” bean seeds in the subsequent stages of germination [2].

krywaniu uszkodzeń mechanicznych. Baranowski i wsp. [3] w swoich badaniach dotyczących detekcji uszkodzeń mechanicznych jablek wykazali, iż termograficzna obserwacja surowca umożliwia identyfikację obszarów w których występują uszkodzenia, zanim będą one zauważalne w świetle widzialnym. W wielu przypadkach termalny ślad obitej powierzchni surowca roślinnego powstaje zanim uszkodzenie stanie się widoczne w świetle widzialnym. Ponadto wykazali, że różnice temperatury na powierzchni zdrowej części jabłka i uszkodzonej mechanicznie wzrastają wraz z upływem czasu od uszkodzenia (rys. 3). Na podstawie przeprowadzonego badania można stwierdzić, iż kamera termowizyjna pozwala na identyfikację kontrastu termalnego pomiędzy tkanką obitą oraz nieobitą i może zostać wykorzystana do wykrywania uszkodzeń mechanicznych już we wczesnym niezauważalnym stadium.

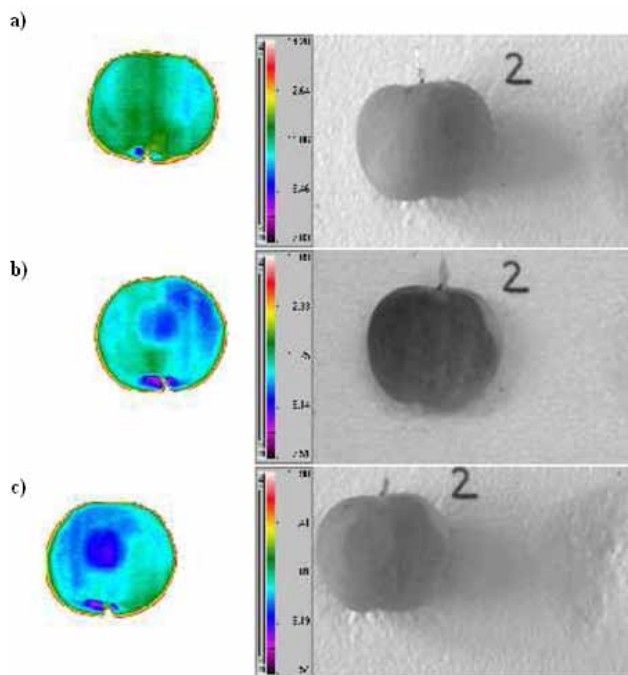
W kolejnym badaniu przeprowadzonym przez Baranowskiego i wsp. [4] wykorzystano metodę termografii do określenia intensywności transpiracji z owoców na przykładzie trzech odmian jablek oraz śliwek. Pomiaru temperatury radiacyjnej prowadzono w ciągu trzech kolejnych dób dla następujących wartości temperatury otoczenia: 11, 18 oraz 23°C. Stwierdzono istotne różnice współczynników transpiracji badanych odmian owoców dla trzech uwzględnionych wartości temperatury otoczenia. Zaobserwowano występowanie różnic pomiędzy radiacyjną temperaturą powierzchni badanych jablek oraz śliwek, a temperaturą powietrza (rys. 4). Zastosowanie pomiaru termowizyjnego do rejestracji radiacyjnej temperatury powierzchni owoców może zostać



Rys. 2. Termogramy powierzchni nasion fasoli wielokwiatowej odmiany „Eureka” niezdolnych do wyprodukowania kielka w kolejnych stadiach procesu pęcznienia [2].

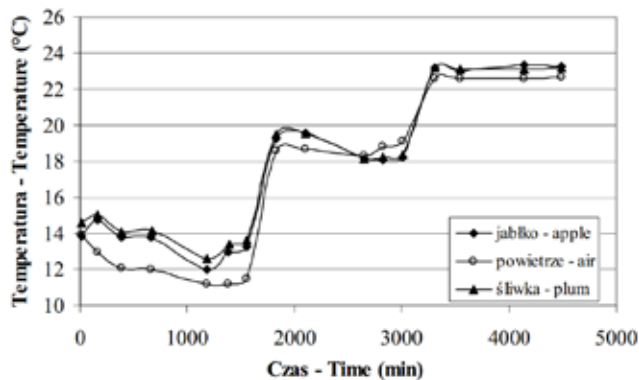
Fig. 2. Thermograms of the surface of the „Eureka” bean seeds unable to produce germ in the subsequent stages of swelling process [2].

wykorzystane w kontroli warunków przechowalniczych, a także monitorowania intensywności parowania z owoców.



Rys. 3. Obrazy termograficzne (z lewej) oraz obrazy w świetle widzialnym (z prawej) jabłka odmiany Jonagold uszkodzonego mechanicznie po upływie: a) 2 godz.; b) 26 godz.; c) 50 godz. [3].

Fig. 3. Thermographic images (left) and visible light images (right) of mechanically damaged Jonagold apples after: a) 2h; b) 26h; c) 50h [3].

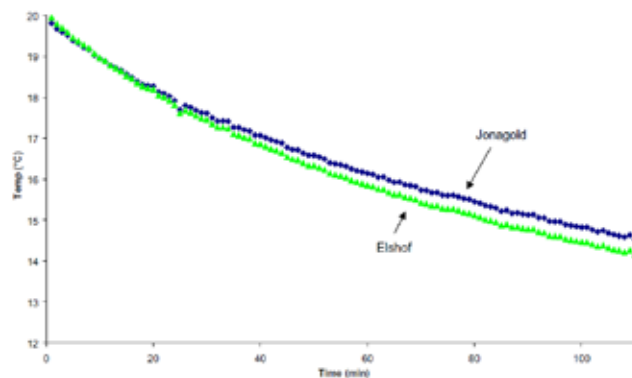


Rys. 4. Przykładowe przebiegi wartości temperatury powietrza oraz temperatury radiacyjnej powierzchni jabłek i śliwek podczas doświadczenia [4].

Fig. 4. Examples of courses of air temperature and two fruit surface radiation temperature during the experiment [4].

Veraberbeke i wsp. [21] wykorzystali pomiary termowizyjne jako nieinwazyjne narzędzie oceny jakości powierzchni jabłek. W badaniu dokonano analizy różnic w temperaturze na powierzchni dwóch odmian jabłek – Jonagold oraz Elshof, podczas ochładzania z temperatury 20°C do 12°C. Zaobserwowano, iż temperatura na powierzchni jabłek odmiany Elshof malała szybciej, aniżeli w przypadku odmiany Jonagold i w efekcie osiągnęła niższą wartość (rys. 5). Wyższa utrata wilgotności oraz większa transpiracja

w przypadku odmiany Elshof, związane są z większym stopniem uszkodzenia warstwy zewnętrznej oraz większą ilością przetłoczek [22]. Na podstawie przeprowadzonego badania stwierdzono, iż kamera termowizyjna charakteryzuje się odpowiednią czułością do pomiaru oceny jakości powierzchni jabłek.



Rys. 5. Zmiany temperatury na powierzchni jabłek odmiany Jonagold i Elshof podczas procesu schładzania [21].

Fig. 5. Surface temperature of individual Jonagold and Elshof apples measured with ThermoCAMTM during cooling from 20°C to 12°C [21].

Wśród możliwości wykorzystania termografii wymień można również m.in. wykrywanie stresu wodnego roślin, kontrolę dojrzałości oraz jakości produktów pochodzenia roślinnego, a także kontrolę temperatury warunków przechowalniczych [2, 9].

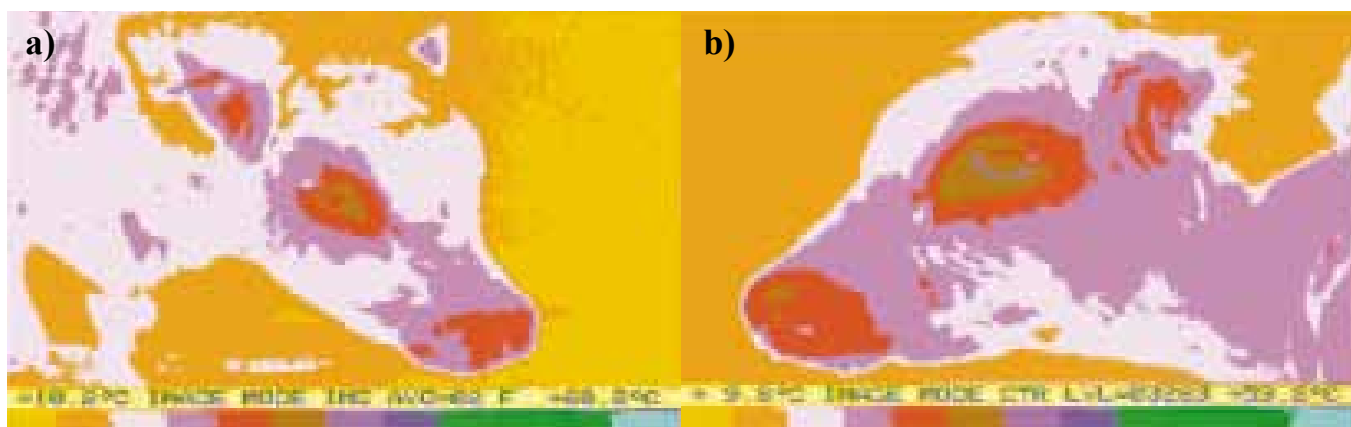
Ocena stanu zdrowia zwierząt hodowlanych

Termografia w podczerwieni znalazła również zastosowanie jako narzędzie do oceny stanu zdrowia zwierząt hodowlanych. Złe warunki hodowlane wpływają negatywnie na dobrostan zwierząt i przyczyniają się do wywołania stresu, a co za tym idzie – mogą skutkować pogorszeniem jakości mięsa oraz obniżeniem bezpieczeństwa żywności. Wywołany stan stresu powoduje zmiany w produkcji oraz utracie ciepła przez zwierzęta, co może zostać wykryte przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej [19].

Technika termowizyjna została wykorzystana także do wczesnego wykrywania infekcji u zwierząt hodowlanych. Schaefer i wsp. [18] przeprowadzili badanie mające na celu wczesne wykrycie BVD, czyli wirusowej biegunki bydła (ang. Bovine Viral Diarrhoea) u cieląt. Przez dziesięć następujących po sobie dni dokonywano kontroli temperatury ciała zwierząt przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej (rys. 6). Na podstawie uzyskanych wyników zaobserwowano różnice w wartości temperatury ciała zainfekowanych zwierząt. W wyniku przeprowadzonego badania stwierdzono, iż termografia w podczerwieni stanowi czuły wskaźnik do detekcji zmian temperatury ciała zwierząt wywołanych infekcjami.

Ocena procesów technologicznych w przemyśle spożywczym

W produkcji żywności pochodzenia zwierzęcego termografia stanowi alternatywną technikę oceny temperatury mięsa podczas obróbki termicznej dokonywanej w czasie rzeczywistym. Pozwala na zdalne, sprawne, szybkie, a przede wszystkim nieinwazyjne kontrolowanie procesów cieplnych,

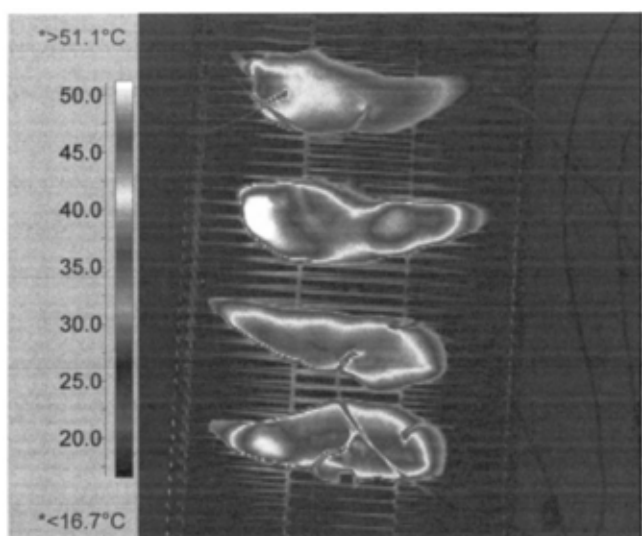


Rys. 6. Obrazy termograficzne cieląt przed oraz po infekcji wirusem BVD: a) dzień 0; b) dzień 10 [18].

Fig. 6. Thermographic images of calves before and after BVD infection: a) day 0; b) day 10 [18].

jednocześnie nie stanowiąc zagrożenia wystąpienia kontaminacji, tym samym zapewnia zachowanie czystości mikrobiologicznej produktu [12].

Pomiary termowizyjne mogą również znaleźć zastosowanie w przemyśle spożywczym do kontroli temperatury produktów poddawanych obróbce termicznej na linii produkcyjnej. Z uwagi na brak możliwości zastosowania metod kontaktowych (termometry, termopary), wykorzystanie nieinwazyjnej metody jaką jest termografia stanowi innowacyjne narzędzie kontroli stopnia termicznej gotowości produktów, a także umożliwia wykrycie i usunięcie produktów wadliwych z linii produkcyjnej.



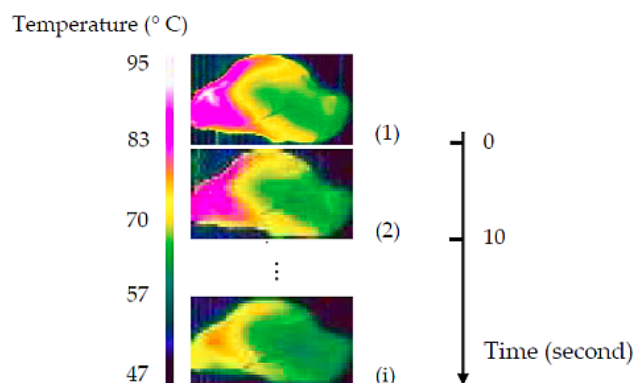
Rys. 7. Obraz termowizyjny czterech piersi kurczaka po obróbce termicznej [10].

Fig. 7. Thermal image of four chicken breasts after heat-treatment [10].

Ibarrá i wsp. [10] wykorzystali technikę termowizyjną do oszacowania temperatury wewnętrznej mięsa drobiowego poddawanego obróbce termicznej (rys. 7). Opracowana metoda estymacji temperatury wewnętrznej wykorzystywała algorytm Levenberga-Marquardta do opisanie korelacji między temperaturą powierzchniową mierzona za pomocą kamery termowizyjnej, a temperaturą wewnętrzną mierzona za pomocą termopary. Pomiary temperatury dokonywane były w 30-sekundowych odstępach czasowych przez 10 minut bezpośrednio po procesie obróbki termicznej. Wydajność opracowanej sieci neuronowej była wysoka, a błąd

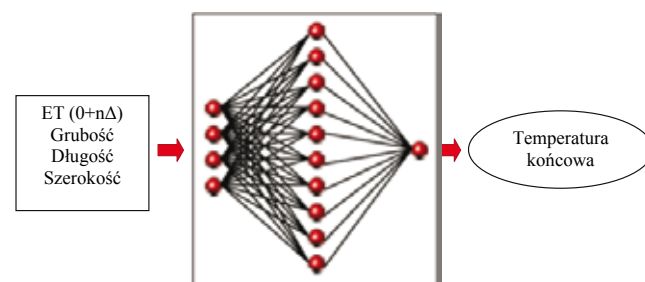
standardowy dla oszacowanej temperatury wewnętrznej wyniósł $\pm 1.01^\circ\text{C}$ dla czasów w zakresie od 0 do 540 sekund po obróbce termicznej. Na podstawie przeprowadzonych testów Ibarra i wsp. [10] stwierdzili, iż połączenie metody termowizyjnej oraz sieci neuronowej może zostać wykorzystane jako procedura kalibracyjna do nieinwazyjnych pomiarów temperatury końcowej mięsa drobiowego po obróbce termicznej.

Ma i wsp. [12] wykorzystali technikę termowizyjną w połączeniu z techniką obrazowania laserowego jako nieinwazyjną metodę szacowania temperatury wewnętrznej w filetach drobiowych poddawanych obróbce termicznej. Po obróbce termicznej filetów drobiowych dokonywano sekwencyjnej rejestracji obrazu termowizyjnego (rys. 8) oraz pomiaru



Rys. 8. Sekwencyjne obrazy termowizyjne uzyskane po obróbce termicznej [12].

Fig. 8. Sequential thermal images obtained after heat-treatment [12].



Rys. 9. Model wyznaczania temperatury wewnętrznej [12].

Fig. 9. The model for determining the internal temperature [12].

temperatury wewnętrznej z wykorzystaniem termopar. Pomiarów dokonywano w czasie 5 minut w 10-sekundowych odstępach. Technika obrazowania laserowego pozwoliła na uzyskanie obrazów 3D służących do wyznaczenia informacji dotyczącej kształtu oraz grubości badanego materiału. Uzyskane dane posłużyły do opracowania modelu nieliniowych procesów wymiany ciepła oraz do estymowania wewnętrznej temperatury mięsa drobiowego z wykorzystaniem sieci neuronowych (rys. 9).

Połączenie zastosowanych metod dało możliwość nieinwazyjnego wyznaczania temperatury wewnątrz produktów pochodzenia zwierzęcego poddawanych obróbce termicznej, pozwalając tym samym na zapewnienie wysokiej jakości oraz bezpieczeństwa żywności.

Detekcja ciał obcych

Jednym z istotnych aspektów w produkcji żywności jest również zapobieganie występowaniu ciał obcych w produktach spożywczych. Obecnie stosowane są liczne metody detekcji oraz separacji substancji niepożądanych. Aktualnie brak jest systemu zdolnego do identyfikacji zanieczyszczeń niezależnie od wielkości i kształtu. W tym celu możliwe jest zastosowanie techniki termowizyjnej. Z uwagi na różną budowę, ciała obce i składniki żywności charakteryzują się zróżnicowaną emisją promieniowania podczerwonego, co stanowi podstawę do ich wykrywania [5]. Rozróżnienie żywności od ciał obcych z wykorzystaniem kamery termowizyjnej następuje w dwojaki sposób – bazując na różnicy wartości współczynnika emisyjności (termografia bierna), bądź różnicy w przewodności cieplnej badanych materiałów, powstałej na skutek zastosowania stymulacji cieplnej (termografia aktywna). Z uwagi na mogące wystąpić niewielkie różnice w wartościach współczynników emisyjności ciał obcych i składników żywności, większe zastosowanie w identyfikacji ciał obcych ma termografia pulsacyjna. Po zastosowaniu stymulacji cieplnej obserwuje się wzrost temperatury na powierzchni badanego obiektu, a następnie podczas ochładzania dokonuje się pomiaru rozkładu temperatur, biorąc pod uwagę fakt, iż różne obiekty ulegają ochłodzeniu z różną prędkością [6].

Zastosowanie termowizji w kontroli procesu pakowania

Kamera termowizyjna może zostać wykorzystana również w przypadku kontroli procesu pakowania i stanu opakowań. Liu i Dias [11] dokonali analizy możliwości zastosowania techniki termowizyjnej do wykrywania defektów opakowań. W pomiarach wykorzystana została technika termografii aktywnej, gdzie zastosowano pobudzenie impulsem cieplnym powierzchni opakowania, a następnie dokonano rejestracji rozkładu temperatury w funkcji czasu. Wykazano wystąpienie różnic temperatury na powierzchni w zakresie 0,2-0,3°C między powierzchnią bez defektów, a powierzchnią opakowania zawierającą defekty tj. rozwarstwienie, puste przestrzenie. Na podstawie przeprowadzonego badania Liu i Dias stwierdzili, iż technika termowizyjna stanowi potencjalne, nieinwazyjne narzędzie służące do detekcji defektów opakowań [20].

PODSUMOWANIE

Technika termowizyjna pełni znaczącą rolę w pomiarach temperatury w wielu procesach przemysłowych, a obecnie prowadzone są liczne badania nad możliwością zastosowania jej również w przemyśle rolno-spożywczym. Badania pokazują, iż istnieje możliwość wykorzystania termografii podczerwieni w zakresie kontroli jakości oraz bezpieczeństwa żywności. Wiele omówionych zastosowań termowizji znajduje się nadal na etapie doświadczalnym, a dalsze badania powinny być ukierunkowane na wprowadzenie oraz adaptację techniki w produkcji przemysłowej. Z uwagi na szereg zalet, w tym szybkość, bezinwazyjność, dokładność, łatwość obsługi, a także krótki czas pomiaru, technika termowizyjna daje szanse zwiększenia wydajności procesów produkcyjnych przemysłu spożywczego. W przeciwieństwie do pozostałych metod rejestracji temperatury, w przypadku termografii podczerwieni niezbędne może być opracowanie zróżnicowanych metodologii pomiaru w związku z różnicami w warunkach pomiarowych oraz badanym materiale (m.in. emisyjność).

LITERATURA

- [1] AMON F., HAMINS A., BRYNER N., & ROWE J. 2008. *Meaningful performance evaluation conditions for fire service thermal imaging cameras*. Fire Safety Journal, Nr. 43, 541-550.
- [2] BARANOWSKI P. 2008. *Temperatura radiacyjna wybranych owoców i nasion jako parametr oceny ich jakości*. Acta Agrophysica, Nr. 159.
- [3] BARANOWSKI P., LIPECKI J., MAZUREK W., WALCZAK R. T. 2005a. *Detekcja uszkodzeń mechanicznych jabłek z wykorzystaniem termografii*. Acta Agrophysica Nr. 6 (1), 19-29.
- [4] BARANOWSKI P., LIPECKI J., MAZUREK W., WALCZAK R. T. 2005b. *Laboratoryjne badania nad możliwością wykorzystania temperatury powierzchni owoców do określania intensywności parowania jako istotnego parametru oceny jakości owoców*. Acta Agrophysica, Nr. 6 (2), 307-318.
- [5] DA-WEN SUN. 2008. *Computer vision technology for food quality evaluation*. Academic Press, 17.
- [6] GINESU G., GIUSTO D. D., MÄRGNER V., MEINLSCHMIDT P. 2002. *Detection of Foreign Bodies in Food by Thermal Imagery*. IAPR Workshop of Machine Vision Applications, 128-131.
- [7] GOWEN A. A., TIWARI B. K., CULLEN P. J., McDONNELL K., O'DONNELL C. P. 2010. *Applications of thermal imaging in food quality and safety assessment*. Trends in Food Science and Technology, Nr. 21, 190-200.
- [8] HELLEBRAND H. J., BEUCHE H., LINKE M. 2002. *Thermal imaging: A promising high-tec method in agriculture and horticulture [w] Physical Methods in Agriculture: Approach to Precision and Quality*, [ed.] Blahovec J., Kutilek M., s. 411-427. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers.

- [9] **HORABIK J. 2011.** Ekspertyza. Stan badań z zakresu właściwości fizycznych surowców roślinnych w aspekcie ich przetwarzania. Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego Polskiej Akademii Nauk, Lublin, 7-9.
- [10] **IBARRA J. G., TAO Y., XIN H. 2000.** *Combined IR imaging-neural network method for the estimation of internal temperature in cooked chicken meat.* Optical Engineering, Nr 39 (11), 3032-3038.
- [11] **LIU Y., DIAS R. 2002.** Evaluation of package defects by thermal imaging. 28th International Symposium for Testing and Failure Analysis, 139-144.
- [12] **MA L., TAO Y., JING H. 2003.** An infrared and laser range imaging system for non-invasive estimation of internal cooking temperature in poultry fillets. American Society of Agricultural and Biological Engineers (Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science).
- [13] **MANICKAVASAGAN A., JAYAS D. S., WHITE N. D. G., PALIWAL J. 2005.** Applications of Thermal Imaging in Agriculture – A Review. Written for presentation at the CSAE/SCGR 2005 Meeting, Winnipeg, Manitoba, paper nr 05-002.
- [14] **MINKINA W. 2004.** Pomiar termowizyjny – przyrządy i metody. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 44-55.
- [15] **NOWAKOWSKI A. 2001.** Postępy termografii – aplikacje medyczne. Wydawnictwo Gdańskie, Gdańsk, 24-30.
- [16] **OLIFERUK W. 2006.** Termografia aktywna w badaniach materiałów. Dwunaste Seminarium NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW, Zakopane, 10-25.
- [17] **OLIFERUK W. 2008.** Termografia podczerwieni w nieniszczących badaniach materiałów i urządzeń. Biuro Gamma, Warszawa, 15-20.
- [18] **SCHAEFER A. L., COOK N., TESSARO S. V., DEREGT D., DESROCHES G., DUBESKI P. L., TONG A. K. W., GODSON D. L. 2004.** *Early detection and prediction of infection using infrared thermography.* Canadian Journal of Animal Science, Nr. 84, 73-80.
- [19] **STEWART M., WEBSTER J. R., SCHAEFER A. L., COOK N. J., SCOTT S. L. 2005.** *Infrared thermography as a non-invasive tool to study animal welfare.* Animal Welfare, Nr. 14, 319-325.
- [20] **VADIVAMBAL R., JAYAS D. S. 2011.** Applications of Thermal Imaging in Agriculture and Food Industry – A Review. Food Bioprocess Technol, Nr. 4, 186-199.
- [21] **VERAVERBEKE E. A., VERBOVEN P., LAMMERTYN J., CRONJE P., De BAERDEMAEKER J., NICOLAÏ B. M. 2006.** *Thermographic surface quality evaluation of apple.* Journal of Food Engineering, Nr. 77, 162-168.
- [22] **VERAVERBEKE, E. A., VAN BRUAENE, N., VAN OOSTVELDT, P., NICOLAÏ, B. M. 2001.** Non destructive analysis of the wax layer of apple by means of confocal laser scanning microscopy. Planta, Nr. 213, 525-533.
- [23] **WALCZYCKA M. 2005.** *Metody inaktywacji i hamowania wzrostu Listeria Monocytogenes w przetworach mięsnych.* Żywność. Nauka. Technologia. Jakość. Nr. 2 (43), 61-72.
- [24] **WIĘCEK B., DE MEY G. 2011.** Termowizja w podczerwieni. Podstawy i zastosowania. Wydawnictwo PAK, Warszawa, 23-29.