Adam KOPEĆ, Kamil DOLIK Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego Politechnika Koszalińska

Wpływ mocy promienników podczerwieni na intensywność sublimacji lodu podczas rozmrażania metodą sublimacyjno-próżniowo-parową

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań nad intensywnością sublimacji lodu. Badania przeprowadzowo na próbkach schabu dla kilku nastaw mocy promienników podczerwieni. Na podstawie uzyskarych wyników oceniono wpływ mocy promienników na intensywność sublimacji lodu. Obliczono również sprawność procesu. Stwierdzono, że zwiększanie mocy promienników powyżej 50W nie ma już znaczącego wpływa na zwiększenie intensywności sublimacji.

Słowa kluczowe: metoda sublimacyjno-próżniowo-parowa, sublimacja, rozmrażanie, podczerwień

The influence of infrared intensity on the ice sublimation during sublimation-vacuum-steam thawing

Summary

In this article a results of sublimation intensity research was presented. The research was conducted on the pork chop samples for the different infrared intensity. On the basis of results an influence of infrared intensity on the sublimation was determined. The sublimation efficiency was calculated. It was concluded that the infrared intensity higher than 50W has a not significant effect on increasing the sublimation intensity.

Key words: sublimation-vacuum-steam method, sublimation, thawing, infrared

Oznaczenia:

- $E_{\rm p}$ energia dostarczona przez promienniki podczerwieni, [kJ]
- $\mathit{E_{s}}$ energia zużyta na sublimację lodu, [kJ]
- m_1 masa lodu odsublimowanego, [kg]
- $\eta_{\rm s}$ sprawność sublimacji, [%]
- p ciśnienie, [Pa]
- p_0 ciśnienie punktu potrójnego wody, p_0 = 610,483 [Pa]
- P_p sumaryczna moc promienników, [W]
- Ps moc sublimacji, [W]

Wstęp

Metoda sublimacyjno-próżniowo-parowa została opracowana w Katedrze Procesów i Urządzeń Przemysty Spożywczego na Politechnice Koszalińskiej i należy do najszybszych metod rozmrażania produktów spożywczych (Dtakun, Kopeć 2006). Stanowi modyfikację metody próżnowo parowej, wykorzystywanej do rozmrażania bloków ryb, mięsa i warzyw (Jason 1974; Kopeć, Diakun 2005). W klasycznej metodzie próżniowo-parowej produkt umieszczany jest w komorze wyposażonej w generator pary (Gruda Postolski 1999). Pod wpływem próżni woda z generatora zaczyna parować w temperaturze ok. 20°C. Powstająca para wodna wypełnia całą objętość komory i osadza się na powietychni produktu, przekazując mu swoje ciepło skraplania. W metodzie sublimacyjnopróżniowo-parowej do intensyfikacji wymiany ciepła między parą i produkten wykorzystuje się zjawisko sublimacji.

Sublimacja jest zjawiškiem przechodzenia lodu w parę wodną z pominięciem fazy ciekłej. Aby mogła zajść, konieczne jest zapewnienie odpowiednich warunków, zobrazowanych na wykresie równowagi fazowej dla wody (rys. 1.) (Gujgo i in. 1968). Zjawisko sublimacji zachodzi poniżej punktu potrójnego wody, określonego parametrami ciśnienia $p_0 = 610,483$ Pa i temperatury $T_0 = 0,0099^{\circ}$ C. W przemyśle spożywczym

- $_{Q_0}$ ciepło przekazywane do sublimowanej próbki z otoczenia, [k]] r_{\$\sigma_s}} ciepło sublimacji, r_s = 2800 [kJ·kg¹]
- T temperatura, [°C]
- \mathcal{T}_0 temperatura punktu potrójnego wody, t_0 = 0,0099 [°C]
- $T_{\rm p}$ temperatura na powierzchni próbki, [°C]
- 🎢 temperatura w komorze, [°C]
- $au_{
 m s}$ czas sublimacji, [s]

sublimację (m.in. przy suszeniu sublimacyjnym produktów) prowadzi się w zakresie ciśnienia od 1 Pa do 200 Pa (Lewicki i in. 1982). Do wytworzenia tak niskiego ciśnienia wykorzystuje się eżektorowe lub mechaniczne pompy próżniowe.





Fig. 1. The phases equilibrium diagram for water. Symbols: 0 – triple point of water, I – solid state (ice), II – liquid state, III – gaseous state (steam) (Gujgo et al. 1968)l

W pierwszym etapie rozmrażania metodą sublimacyjnopróżniowo-parową w komorze próżniowej wytworzona zostaje próżnia sublimacyjna (ciśnienie niższe niż 610,483 Pa). W etapie tym następuje ciągłe usuwanie powietrza i wilgoci z wnętrza komory, a w strukturze lodu zawartego na powierzchni produktu wytwarza się struktura porowata (Kopeć 2008). Struktura porowata jest wypełniona mieszaniną kryształów lodu, zagęszczonego soku komórkowego i rozrzedzonej próżnią pary wodnej (Diakun, Kopeć 2006).

W drugim etapie zamyka się zawór pompy i wprowadza do wnętrza komory parę wodną. Para zostaje wytworzona pod wpływem podciśnienia w generatorze zawierającym wodę o temperaturze około 20°C. Wprowadzona do wnętrza komory, wnika w strukturę porowatą wytworzoną w trakcie etapu sublimacji i kondensując w niej, rozmraża produkt od wewnątrz. Aby zagwarantować odpowiednio wysoki stopień rozmrożenia produktu, w pierwszym etapie należy wytworzyć strukturę o odpowiednio dużej pojemności (Kopeć, Diakun 2007). Wytwarzanie struktury porowatej można intensyfikować poprzez doprowadzenie energii cieplnej z zewnątrz. Ciepło doprowadzane do produktu wyrównuje straty energii związane z przemianą fazową lodu w parę wodną. Niedostateczna ilość doprowadzonej energii cieplnej skutkuje obniżeniem temperatury produktu i spowolnieniem sublimacji. Z kolei nadmiar energii cieplnej może spowodować rozmrożenie produktu, załamanie struktury porowatej i przegrzanie jego powierzchni. Autorzy w swoich badaniach, jako źródło energii cieplnej, wykorzystują promienniki podczerwieni.

Cel badań

Celem badań było określenie wpływu strumienia ciepła dostarczanego do próbki, uzależnionego od zastosowanej/mocy promienników podczerwieni, na intensywność i sprawność sublimacji lodu z próbki.

Stanowisko pomiarowe

W badaniach wykorzystano stanowisko pomiarowe, którego schemat przedstawiono na rysunku 2. Głównymi elementami stanowiska są: komora próżniowa o pojemności 33l, dwustopniowa pompa próżniowa BL 15. zewnętrzny generator pary złożony ze szklanego zbiornika i płaszcza grzewczego oraz promienniki podczerwieni o regulowanej mocy od 0 do 50W zainstalowane wewnątrz komory. Stanowisko zostało wyposażone w czwiniki pomiarowe umożliwiające ciągły pomiar:

• temperatury próbki i temperatury w komorze - termopary typu K (NiCr–NiAl), których charakterystyka jest zgodna z PN–81/M.53854.06;

• ciśnienia w komorze próżniomierz oporowy MP211 firmy ELVAC, złożony z głowicy Piraniego typu RG10 i elektronicznego układu zasilająco-pomiarowego;

• masy próblet moduł wagowy typu IL02, firmy Mensor, złożony z przetwornika indukcyjnego oraz modułu odczytującego.

Przewody elektryczne czujników znajdujących się wewnątrz komory zostały wyprowadzone na zewnątrz poprzez specjalne przepusty prądowe, zapewniające odpowiednią szczelność całej instalacji i połączone poprzez terminal zaciskowy PCLD 8710 z kartą pomiarową PC1710HG. Rejestracji danych dokonywano za pomocą oprogramowania LabView.

Materiał badawczy i metodyka pomiaru



W badaniach wykorzystano schab pochodzący z tuczników rasy polska biała zwisłoucha (typ mięsny), których waga wynosiła od 100 do 110 kg. Tusza przez dwa dni po uboju przechowywana była w warunkach chłodniczych. Próbki o grubości 20 mm, długości 110 mm i szerokości 50 mm były wycinane ze środkowej części schabu, a następnie zamrażane konwekcyjnie w temperaturze -30°C i przechowywane w tych warunkach przez dwa tygodnie. Przed unieszczeniem w komorze, na powierzchni próbki zamocowano termoparę.

Próbki mięsa zawieszano w komorze, na haku modułu wagowego, w odległości 9 cm od promienników podczerwieni. Stopień odwodnienia próbek ustalono na 10%. Zmienną wejściową była moc promienników, którą nastawiano na następujące wartości: 0W (bez dostarczania ciepła przez promienniki), 10W, 20W, 35W, 50W i 80W. Dla każdej z wymienionych nastaw mocy przeprowadzono po trzy próby. Wielkośćiami wyjściowymi poddanymi analizie były: zmiana temperatury na powierzchni próbki, zmiana temperatury w komorze, zmiana masy próbki oraz czas procesu.



Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego. Oznaczenia: 1 – komora próżniowa, 2 – pokrywa szklana, 3 – próbka schabu, 4 – zawór odcinający generator pary, 5 – zawór odcinający pompę, 6 – termopara w komorze, 7 – termopara w centrum próbki, 8 – termopara na powierzchni próbki, 9 – termopara w generatorze, 10 – czujnik indukcyjny zmiany masy, 11- czujnik wilgotności, 12 – pompa próżniowa BL-15, 13 – zbiornik z wodą, 14 – podgrzewacz, 15 – przetwornik podciśnienia, 16 – terminal zaciskowy, 17 – komputer z kartą pomiarową, 18 – drukarka, 19 – zawór zapowietrzający, 20 – promienniki podczerwieni

Fig. 2. Test stand scheme. Symbols: 1 - vacuum chamber, 2 - glass cover, 3 - pork chop sample, 4 - steam generator valve, 5 - vacuum pump valve, 6 - thermocouple in chamber, 7 - thermocouple in sample centre, 8 - thermocouple in sample surface, 9 - thermocouple in steam generator, 10 - mass change sensor, 11 - air moisture sensor, 12 - BL-15 vacuum pump, 13 - water reservoir, 14 - water heater, 15 - vacuum transducer, 16 - terminal, 17 - computer with measurement card, 18 - printer, 19 - air valve, 20 - infrared emitter

Poszczególne doświadczenia składały się w z dwóch etapów. W pierwszym (sublimacja) zawór generatora pary był zamknięty, a otwarty był zawór łączący komorę z pompą próżniową. Wewnątrz komory wytworzone zostało środowisko próżni, które było utrzymywane do uzyskania stopnia odwodnienia próbki wynoszącego 10%. Po osiągnięciu takiego stopnia odwodnienia rozpoczynał się drugi etap procesu (naparowanie). Zawór między komorą i pompą został zamknięty, a następnie otworzono zawór generatora pary. Woda w generatorze, pod wpływem obniżonego ciśnienia, zaczęła gwałtownie parować, powstała para wypełniła wnętrze komory skraplając się na powierzchni i wewnątrz struktury porowatej rozmrażanych próbek.

Wpływ mocy promienników na intensywność sublimacji oceniono na podstawie danych z otrzymanych rejestrat. Dla każdego z przeprowadzonych doświadczeń obliczono sprawność sublimacji (1) i moc sublimacji (2). Z wyników obliczeń wyznaczono wartości średnie sprawności i mocy sublimacji dla każdego doświadczenia oraz wykonano rachunek błędów. Przedziały ufności, przedstawione graficznie na wykresach wyliczono w oparciu o teorię estymacji przedziałowej, z wykorzystaniem rozkładu *t*-Studenta, dla ilości oznaczeń w serii n = 3 i poziomu ufności $\alpha = 0,05$.

$$\eta_s = \frac{E_s}{E_p + Q_o} \cdot 100 = \frac{m \cdot r_s}{\left(P_p \cdot \tau_s\right) + Q_0} \cdot 100$$
 (1)

$$P_s = \frac{E_s}{\tau_s} \tag{2}$$

gdzie: $Q_0 = E_s dla P_p = 0$.

Wyniki i dyskusja

Wyniki rejestracji zmian wielkości wyjściowych zaprezentowano na rysunkach 3, 4 i 5. W przypadku rejestrat zmian masy próbek (rys. 3) zauważono, że wraz ze wzrostem mocy promienników zmniejsza się czas sublimacji. Czas sublimacji skrócił się znacznie już przy mocy promienników wynoszącej 10W (o około 30%). Podniesienie wartości mocy promienników do 20W przyniosło ze sobą skrócenie czasu sublimacji o około 50%. Szybkości sublimacji dla mocy promienników wyższej niż 50W zwiększała się już nieznacznie.



Rys. 3. Masy próbki podezas rozmrażania metodą sublimacyjno-próżniowoparowądla różnych nestaw/mocy promienników. Oznaczenia: A - 0W, B - 10W, C - 20W, D - 35W, E - 50W, F - 80W

Fig. 3. The sample mass during the sublimation-vacuum-vapor thawing for the different infrared intensity. A - 0W, B - 10W, C - 20W, D - 35W, E - 50W, F - 80W

Na rýstniku 4 przedstawiono wyniki pomiaru zmienności temperatury na powierzchni próbki. Dla każdej z krzywych wyróżnić możemy trzy charakterystyczne fazy, z czego dwie występują na etapie sublimacji. Faza pierwsza to samo zamrażanie, które następuje pod wpływem obniżającego się ciśnienia. Temperatura na powierzchni próbki obniża się, do chwili osiągnięcia równowagi z ciśnieniem panującym wewnątrz komory. Z tą chwilą rozpoczyna się druga faza, w trakcie której na powierzchni próbki powstaje odwodniona struktura porowata. W fazie tej temperatura na powierzchni próbki powoli wzrasta. Fazę trzecia charakteryzuje gwałtowny wzrost temperatury na powierzchni produktu. Faza ta jest wynikiem zaparowania konory – para wodna uchodząca z wnętrza generatora pary skrápla się na powierzchni produktu i wewnątrz struktury porowatej oddając mu utajone ciepło skraplania.



) Rys. 4. Temperatura na powierzchni próbki w czasie rozmrażania metodą sublimacyjno-próżniowo-parowądla różnych nastaw mocy promienników. Oznacze-/nia: A – 0W, B – 10W, C – 20W, D – 35W, E – 50W, F – 80W

Fig. 4. The sample surface temperature changes during the sublimation-vacuum-vapor thawing for the different infrared intensity. A – 0W, B – 10W, C – 20W, D – 35W, E - 50W, F – 80W



Rys. 5. Temperatura wewnątrz komory w czasie rozmrażania sublimacyjnopróżniowo-parowego dla różnych nastaw mocy promienników. Oznaczenia: A – 0W, B – 10W, C – 20W, D – 35W, E – 50W, F – 80W

Fig. 5. The temperature inside chamber during the sublimation-vacuum-vapor thawing for the different infrared intensity. A - 0W, B - 10W, C - 20W, D - 35W, E - 50W, F - 80W

Zauważono, że znaczny wzrost temperatury na powierzchni próbki następuje dopiero po zwiększeniu mocy promienników powyżej 20W. Przy mocy promienników wynoszącej 10W temperatura na powierzchni próbki była zbliżona do temperatury podczas rozmrażania bez użycia promienników.

Na rejestratach zmian temperatury wewnątrz komory wyróżnić możemy dwie fazy. Faza pierwsza występuje w etapie sublimacji i charakteryzuje się przyrostem temperatury wewnątrz komory (rys. 5). Przyrost temperatury spowodowany jest oddziaływaniem promienników podczerwieni i osiąga najniższą wartość przy rozmrażaniu z wyłączonymi promiennikami, a najwyższą – przy najwyższej nastawie mocy promienników. Druga faza, charakteryzująca się spadkiem temperatury, występuje w etapie zaparowania komory i jest spowodowana oddziaływaniem pary wodnej o temperaturze niższej niż panująca w komorze.



Rys. 6. Sprawność sublimacji w zależności od mocy promienników podczerwieny Fig. 6. Sublimation efficiency depending on the infrared intensity

Temperatura o wartości wyższej niż 30°C jest niekorzystna dla rozmrażanego surowca, powoduje bowiem jego przegrzanie. Temperaturę przekraczającą tą wartość uzyskano dla nastaw mocy promienników wynoszących: 35W,59W i 80W.





Wyniki obliczeń sprawności sublimacji przedstawiono na rysunku 6, natomiast rysunek 7 przedstawia zależność mocy sublimacji od mocy dostarczanej przez promierniki.

Na wykresie 6 można spostrzec, że wraz ze wzrostem mocy promienników maleje stopień wykorzystania dostarczonego ciepła. Znaczna jego część zostaje zużyta na ogrzanie rozrzedzonego powietrza i ścian komory, a tylko nieznaczna na samą sublimację. Dla mocy promienników 10W sprawność wynosi 35,77%, natomiast przy mocy 80W spada do 10,96%.

Jednocześnie ze spadkiem sprawności sublimacji wzrasta jej moc (rys. 7). Jej przyrost jest znaczny w przedziale mocy promienników od 10W do 50W. Zwiększanie mocy promienników podczerwieni powyżej 50W nie ma już większego wpływu na moc sublimacji. Moc sublimacji swobodnej (bez dostarczania ciepła z promienników podczerwieni) wynosi 2,56W.

Podsumowanie

W trakcie badań stwierdzońo, że dostarczanie dodatkowego ciepła za pomocą promienników podczerwieni znacznie skraca czas sublimacji. Zastosowanie promienników o mocy 10W może skrócić czas procesu o 30%. Czas ten można skrócić jeszcze bardziej, poprzez nastawienie mocy promienników na 50W (70%) Dalsze zwiększenie mocy promienników wpływa w niewietkim stopniu na przyspieszenie procesu sublimacji. Ponadto wyższe nastawy mocy promienników powodują znacźny wzrost temperatury w komorze. Nie jest wskazane przekraczanie temperatury wokół niej T_k powyżej 30°C. Bezpieczne wartości temperatury w komorze osiągnięto dla mocy promienników rzędu 10W.

Bibliografia

A. Diakun J., Kopeć A. 2006. Porównanie procesu rozmrażania mięsa metodami próżniowo-parową i sublimacyjnopróżniowo-parową. Inżynieria Rolnicza, 7(82), 73–81.

2. Gruda Z., Postolski J. 1999. Zamrażanie żywności. WNT, Warszawa, ISBN: 83-204-2332-5.

3. Gujgo E.I., Żurawska N.K., Kauchczeszwili E.I. 1968. *Susenie sublimacyjne produktów spożywczych.* Warszawa.

Jason A. C. 1974. *Thawing frozen fish*. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Torry Research Station, HMSO Press.
 Kopeć A. 2008. *Czas rozmrażania i rehydratacji w procesie rozmrażania mięsa metodą sublimacyjno-próżniowoparową*. Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 6, 109–110.

6. Kopeć A., Diakun J. 2005. *Kinetyka zmiany masy i temperatury w procesie sublimacyjno-parowo-próżniowego rozmrażaniam mięsa.* Inżynieria Rolnicza, 11(71), 251–258.

7. Kopeć A., Diakun J. 2007. *Wyznaczenie stopnia odwodnienia sublimacyjnego w procesie sublimacyjno-próżniowo-parowego rozmrażania mięsa*. Inżynieria Rolnicza, 5(93), 229–236.

8. Lewicki P., 1982. *Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego.* Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa. ISBN: 83-204-0391-X.

Adam Kopeć, Kamil Dolik Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego Politechnika Koszalińska <u>adam.kopec@tu.koszalin.pl</u> <u>k.d.dolik@gmail.com</u>