

Dr inż. Iwona SITKIEWICZ

Dr inż. Zbigniew PAŁACHA

Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, SGGW w Warszawie

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE I REOLOGICZNE ŻÓŁTKA JAJA KURZEGO Z DODATKIEM SOLI KUCHENNEJ®

Badano wpływ temperatury w zakresie 20-60°C na właściwości cieplne i reologiczne mieszaniny żółtka jaja kurzego z solą kuchenną. Gęstość, ciepło właściwe i wskaźnik płynięcia były niezależne od temperatury, natomiast przewodność cieplna właściwa i współczynnik konsystencji obniżały się istotnie wraz ze wzrostem temperatury. Dopasowano równania do danych doświadczalnych przewodności cieplnej właściwej i współczynnika konsystencji w badanym zakresie temperatury.

WSTĘP

Jajka są bogatym i dobrze zbilansowanym źródłem podstawowych składników odżywczych w diecie człowieka, złożonych z kwasów tłuszczowych, makro- i mikroelementów, witamin oraz białek o wysokiej wartości odżywczej [11]. Są one jednym z najczęściej konsumowanych artykułów spożywczych na świecie, stanowiąc równocześnie podstawowy surowiec w przemyśle jajczarskim [3]. Suszone, mrożone i płynne półprodukty i produkty jajczarskie są często wykorzystywane jako komponenty w wielu recepturach produktów spożywczych.

Prawidłowe projektowanie procesów technologicznych, konstruowanie maszyn i urządzeń do realizacji tych procesów, wymaga znajomości właściwości fizycznych żywności. Ważną rolę wśród tych właściwości odgrywają właściwości cieplne i reologiczne.

Poprawny projekt pasteryzatora i dobór właściwych parametrów pasteryzacji płynnych produktów spożywczych wymaga m.in. znajomości zarówno właściwości cieplnych (gęstość, ciepło właściwe, przewodność cieplna właściwa) jak i reologicznych (współczynnik konsystencji, wskaźnik płynięcia) [4, 15]. Bardzo ważny jest również wpływ temperatury na zjawisko płynięcia, szczególnie przy projektowaniu pasteryzatorów o działaniu ciągłym. Uzyskane parametry reologiczne decydują o średnicy i długości wymiennika ciepła, w którym przebiega proces ogrzewania i przetrzymywania materiału oraz o mocy pompy [2, 15].

W literaturze są opublikowane dane dotyczące właściwości cieplnych wielu płynnych produktów spożywczych, takich jak: soki [4, 14], jogurty [12], mleko [8], ekstrakty kawy [13] oraz dane dotyczące właściwości reologicznych np. soków [17] czy wsadów owocowych [16]. Natomiast, są bardzo skromne informacje na temat właściwości cieplnych i reologicznych płynnych produktów jajczarskich [Combra i in., 2006]. Poza tym, w dostępnej literaturze brak jest informacji dotyczących wpływu innych składników dodanych do masy jajowej na właściwości fizyczne otrzymanych mieszanin.

Celem pracy było wyznaczenie gęstości, ciepła właściwego, przewodności cieplnej właściwej oraz parametrów reologicznych (współczynnika konsystencji i wskaźnika płynięcia) mieszaniny żółtka jaja kurzego z dodatkiem soli kuchennej w różnej temperaturze.

METODYKA BADAŃ

Materiał do badań stanowiło żółtko jaja kurzego z jaj przechowywanych nie dłużej niż dwa dni (jaja pochodziły z Zakładu Hodowli Drobiu Wydziału Nauk o Zwierzętach SGGW). Jaja rozbijano ręcznie i oddzielano białko od żółtka, a następnie do określonej masy żółtek dodawano odpowiednią ilość soli kuchennej (sól warzona próżniowo jodowana, producent Inowrocławskie Kopalnie Soli Solino S.A.) tak, aby stężenie soli w mieszaninie wyniosło 12%. Po dodaniu soli do żółtka materiał mieszano delikatnie przez 3 minuty.

1. Oznaczanie gęstości mieszaniny

Gęstość mieszaniny oznaczano metodą piknometryczną [4] w temperaturze 20, 40 i 60°C. Próbkę żółtka z solą umieszczano w standardowym piknometrze o pojemności 25 cm³ i ważono na wadze analitycznej (Metler AE 240S) z dokładnością ±0,0001 g. Piknometr poddano cechowaniu na wodzie destylowanej w każdej temperaturze pomiaru. Oznaczenie gęstości mieszaniny wykonano w 5 powtórzeniach.

2. Określenie ciepła właściwego mieszaniny

Ciepło właściwe mieszaniny obliczono, wykorzystując zasadę addytywności, na podstawie danych literaturowych wartości ciepła właściwego żółtka jaja kurzego oraz soli kuchennej w temperaturze 20, 40 i 60°C. Do obliczeń przyjęto wartości ciepła właściwego żółtka jaja 3,56 kJ/kg·K [5] oraz ciepła właściwego chlorku sodu: 0,8529 kJ/kg·K w 20°C; 0,8649 kJ/kg·K w 40°C i 0,8769 kJ/kg·K w 60°C [10].

3. Oznaczenie przewodności cieplnej właściwej mieszaniny

Przewodność cieplną właściwą wyznaczono metodą sondy impulsowej wg Madejskiego [7, 9] z zastosowaniem gliceryny jako wzorca w temperaturze 20, 40 i 60°C. Metoda ta opiera się na zasadzie, że prędkość chłodzenia termopary szybko przeniesionej do badanego materiału zależy od jego właściwości cieplnych. Termoparę (Cu – Ko) zaopatrzoną na końcu w kulistą sondę wykonaną z cyny (średnica sondy 3 mm) wprowadzano do pojemnika z wrzącą wodą i po ogrzaniu sondy do temperatury 100°C, w chwili $\tau = 0$ „błyskawicznie” umieszczano ją w próbce o temperaturze początkowej 20, 40 lub 60°C, rejestrując zmianę temperatury powierzchni sondy w ustalonym przedziale czasu (30 sekund). Analogiczne pomiary przeprowadzono dla wzorca (gliceryny). Mając dane dla próbki i wzorca w tym samym przedziale czasu, obliczono

przewodność cieplną właściwą próbki (λ) z następującego równania:

$$\lambda = \lambda_w \frac{T_w - T_o}{T - T_o} \quad (1)$$

gdzie: λ_w - przewodność cieplna właściwa wzorca, W/m·K,

T_w - temperatura wzorca po czasie τ , K,

T - temperatura badanej próbki po czasie τ , K,

T_o - temperatura początkowa badanej próbki, K.

Oznaczenie przewodności cieplnej właściwej wykonano w 3 powtórzeniach.

4. Wyznaczenie parametrów reologicznych mieszaniny

Parametry reologiczne (współczynnik konsystencji K , oraz wskaźnik płynięcia n) wyznaczono z krzywych lepkości. Krzywe lepkości mieszaniny żółtka jaja i soli wyznaczono za pomocą programowanego wiskozymetru Brookfield, model RV DV-III, pracującego w układzie pomiarowym współosiowych cylindrów z wewnętrznym cylindrem RV 07. Badanie przeprowadzono przy prędkościach obrotowych cylindra zmieniających się od 5 RPM do 235 RPM co 10 RPM. Krzywe płynięcia wykreślono za pomocą programu REOCALC w układzie współrzędnych: lepkość – RPM.

Szybkość ścinania (γ) obliczono na podstawie równania:

$$\gamma = \frac{2 \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot N \cdot R_c^2 \cdot R_b^2}{R_b^2 [R_c^2 - R_b^2]} \quad (2)$$

gdzie: N - liczba obrotów cylindra wewnętrznego, RPM,

R_c - promień cylindra zewnętrznego ($R_c = 0,95$ cm),

R_b - promień cylindra wewnętrznego ($R_b = 0,16$ cm).

Na podstawie obliczonej szybkości ścinania sporządzono wykresy krzywych lepkości (współczynnik lepkości – szybkość ścinania) i wykorzystując program komputerowy Table Curve 2D v3 obliczono parametry reologiczne. Przeprowadzone badania wstępne wykazały, że mieszanina żółtka jaja kurzego i soli kuchennej jest cieczą neniutonowską spełniającą prawo potęgowe, stąd krzywe lepkości opisano równaniem:

$$\eta = K \cdot \gamma^{n-1} \quad (3)$$

OMÓWIENIE I DYSKUSJA WYNIKÓW

Wpływ temperatury na średnie wartości gęstości mieszaniny żółtka jaja kurzego z solą kuchenną przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Gęstość mieszaniny żółtka jaja kurzego z solą kuchenną

Zawartość wody, ułamek masowy	Gęstość (kg/m ³) w temperaturze		
	20°C	40°C	60°C
0,429	1038±4	1036±3	1035±5

Uzyskane wyniki wskazują na nieznaczne obniżenie gęstości badanego materiału wraz ze wzrostem temperatury. Tym niemniej przeprowadzona jednoczynnikowa analiza wariancji wykazała brak wpływu temperatury na uzyskane wartości średnie gęstości badanej mieszaniny ($F_o = 0,524$, $F_{tabl} = 5,143$ dla $\alpha = 0,05$). W dostępnej literaturze brak jest informacji o wpływie dodatku soli kuchennej na gęstość otrzymanej mieszaniny żółtka jaja z solą. Podane są jedynie wartości gęstości dla czystego żółtka jaja kurzego, które istotnie różnią się między sobą. Denys i in. [5] oraz ASHRAE [1] podali gęstość czystego żółtka jaja kurzego wynoszącą 1035 kg/m³, która dobrze koreluje z wartościami gęstości badanej mieszaniny. Natomiast, ostatnio opublikowane wartości gęstości dla czystego żółtka jaja kurzego przez Combra i in. [3] były znacznie wyższe i kształtowały się na poziomie od 1144 do 1126 kg/m³ w zakresie temperatury od 0 do 38°C.

Obliczone ciepło właściwe mieszaniny żółtka jaja kurzego z solą kuchenną praktycznie nie zmieniło się w przedziale temperatury 20 – 60°C i wyniosło 3,24 kJ/kg·K (tab. 2).

Tabela 2. Ciepło właściwe mieszaniny żółtka jaja kurzego z solą kuchenną

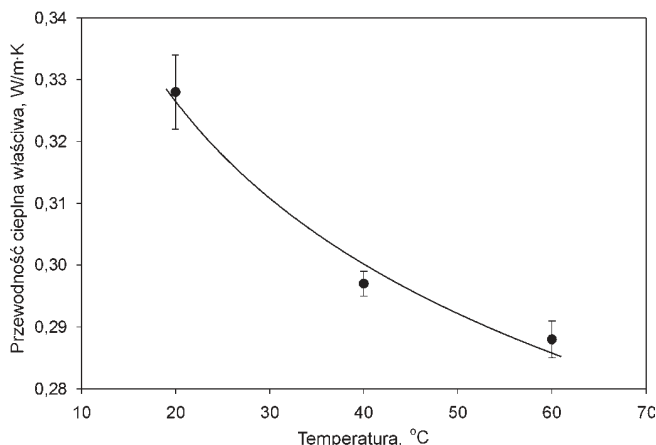
Zawartość wody, ułamek masowy	Ciepło właściwe (kJ/kg·K) w temperaturze		
	20°C	40°C	60°C
0,429	3,235	3,237	3,238

O końcowej wartości ciepła właściwego mieszaniny zdecydowała przyjęta do obliczeń stała wartość ciepła właściwego czystego żółtka jaja kurzego wynosząca 3,56 kJ/kg·K [5]. Praktyczne potwierdzenie braku wpływu temperatury na ciepło właściwe czystego żółtka jaja kurzego wykazano w pracy Coimbra i in. [3]. Wartości ciepła właściwego w przedziale temperatury 22 – 38°C wyniosły odpowiednio 2,714 i 2,772 kJ/kg·K, lecz były znacznie niższe od wartości przyjętej do obliczeń.

Tabela 3. Przewodność cieplna właściwa mieszaniny żółtka jaja kurzego z solą kuchenną

Zawartość wody, ułamek masowy	Przewodność cieplna właściwa (W/m·K) w temperaturze		
	20°C	40°C	60°C
0,429	0,328±0,006	0,297±0,002	0,288±0,003

Przewodność cieplna właściwa obniżała się istotnie ze wzrostem temperatury i osiągnęła wartość 0,328 W/m·K w temperaturze 20°C oraz 0,288 W/m·K w temperaturze 60°C (tab. 3, rys. 1).

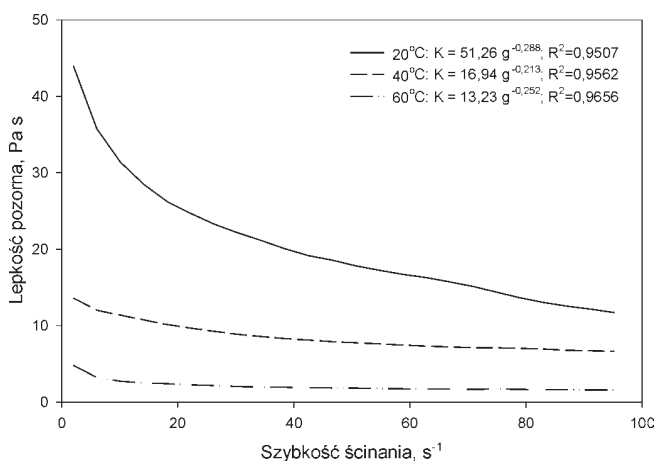


Rys. 1. Wpływ temperatury na przewodność cieplną właściwą mieszanki żółtka jaja z solą kuchenną.

Przeprowadzona analiza statystyczna potwierdziła wpływ temperatury na uzyskane wartości średnie przewodności cieplnej właściwej mieszanki żółtka jaja z solą ($F_o = 82,111$, $F_{\text{tabl}} = 5,143$ dla $\alpha = 0,05$). Zastosowany model potęgowy:

$$\lambda = 0,4694 \cdot t^{-0,1211} \quad (4)$$

dobrze opisywał wpływ temperatury w przedziale 20 – 60°C na uzyskane wartości przewodności cieplnej właściwej badanej mieszanki ($R^2 = 0,9791$). Denys i in. [5] podali wartość przewodności cieplnej właściwej dla żółtka jaja kurzego wynoszącą 0,337 W/m·K, natomiast Coimbra i in. [3] potwierdzili obniżanie się przewodności cieplnej właściwej czystego żółtka jaja kurzego w przedziale temperatury 0 – 38°C od 0,407 do 0,389 W/m·K.



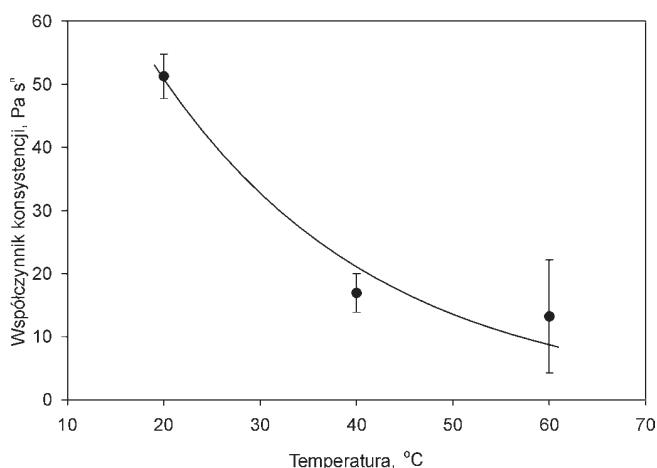
Rys. 2. Wpływ temperatury na przebieg krzywych lepkości mieszanki żółtka jaja z solą kuchenną.

Na rysunku 2 przedstawiono wpływ temperatury na przebieg krzywych lepkości mieszanki żółtka jaja z solą kuchenną. Wraz ze wzrostem temperatury lepkość pozorna mieszanki przy danej szybkości ścinania obniżała się, a przebieg krzywych lepkości był typowy dla cieczy nieniutonowskiej spełniającej prawo potęgowe. Potwierdziły to wysokie wartości współczynników determinacji (R^2) powyżej 0,95, wskazując jednocześnie na dobre dopasowanie równania potęgowego do danych lepkości w funkcji szybkości ścinania.

Tabela 4. Parametry reologiczne mieszanki żółtka jaja kurzego z solą kuchenną

Temperatura °C	Współczynnik konsystencji K, Pa·s ⁿ	Wskaźnik płynięcia n
20	51,26 ± 3,52	0,71 ± 0,03
40	16,94 ± 3,04	0,79 ± 0,03
60	13,23 ± 8,95	0,75 ± 0,05

W tabeli 4 zestawiono parametry reologiczne, współczynnika konsystencji (K) i wskaźnika płynięcia (n), dla badanej mieszanki. Współczynnik konsystencji obniżył się istotnie ze wzrostem temperatury ($F_o = 21,610$, $F_{\text{tabl}} = 5,786$ dla $\alpha = 0,05$). W temperaturze 20°C K osiągnął najwyższą wartość wynoszącą 51,26 Pa·sⁿ i obniżył się prawie czterokrotnie w temperaturze 60°C, osiągając wartość 13,23 Pa·sⁿ. W dostępnej literaturze brak jest danych na temat wartości K dla żółtka jaja. Tym niemniej uzyskane wartości K są zbliżone do wyników otrzymanych przez Wei i in. [16] dla wsadów owocowych (jabłkowego, cytrynowego, malinowego, borówkowego) w temperaturze 25°C (52 – 104 Pa·sⁿ).



Rys. 3. Wpływ temperatury na współczynnik konsystencji mieszanki żółtka jaja z solą kuchenną.

Wykorzystano równanie Arrheniusa [18] do opisu wpływu temperatury na wartość współczynnika konsystencji badanej mieszanki (rys. 3) i stwierdzono dobre dopasowanie tego równania, ze współczynnikiem determinacji powyżej 0,95. Podobne dopasowanie stwierdzili Ibarz i in. [6] dla koncentratu soku pomarańczowego oraz Zainal i in. [18] dla soku z różowej gwawy.

Obniżanie się współczynnika konsystencji wraz ze wzrostem temperatury wpłynie na wzrost prędkości przepływu mieszanki żółtka jaja z solą w wymienniku ciepła (mniejsze opory przepływu), a tym samym czas ogrzewania i przetrzymywania materiału w danej temperaturze będzie krótszy.

Wskaźnik płynięcia (n) praktycznie nie zależał od temperatury materiału ($F_o = 4,261$, $F_{\text{tabl}} = 5,143$ dla $\alpha = 0,05$) i kształtował się na poziomie 0,75. Oznacza to, że mieszanka żółtka jaja z solą utrzymała charakter cieczy nieniutonowskiej w badanym zakresie temperatury.

WNIOSKI

1. Wyznaczone właściwości cieplne i parametry reologiczne mieszaniny żółtka jaja kurzego z solą kuchenną wnoszą ważny wkład do bazy danych właściwości fizycznych żywności. Ich znajomość znajdzie bezpośrednie zastosowanie w projektowaniu wymienników ciepła.
2. Gęstość i ciepło właściwe badanej mieszaniny były praktycznie niezależne od temperatury w zakresie 20-60°C, podczas gdy przewodność cieplna właściwa obniżała się istotnie w badanym zakresie temperatury.
3. Mieszanina żółtka jaja z solą jest typową cieczą nieniurowną. Stwierdzono istotny wpływ temperatury w badanym zakresie na spadek współczynnika konsystencji, natomiast wskaźnik płynięcia był niezależny od temperatury i wyniósł 0,75.
4. Wyprowadzone równania do obliczania przewodności cieplnej właściwej i współczynnika konsystencji będą przydatne przy optymalizacji parametrów procesu ogrzewania badanej mieszaniny.

LITERATURA

- [1] American Society of Heating, Refrigeration and Air conditioning Engineers. Inc. "Handbook and product directory application", ASHRAE, 1994, 23, USA.
- [2] Bayindirli L.: Density and viscosity of grape juice as a function of concentration and temperature, *J. Food Process. Preserv.*, 1993, 17, 147-151.
- [3] Coimbra J.S.R., Gabas A.L., Minim L.A., Garcia Rojas E.E., Telis V.R.N., Telis-Romero J.: Density, heat capacity and thermal conductivity of liquid egg products. *J. Food Engng.*, 2006, 74, 186-190.
- [4] Constenla D.T., Lozano J.E., Crapiste G.H.: Thermophysical properties of clarified apple juice as a function of concentration and temperature, *J. Food Sci.*, 1989, 54(3), 663-668.
- [5] Denys S., Pieters J.G., Dewettinck K.: Computational fluid dynamics analysis of combined conductive and convective heat transfer in model eggs, *J. Food Engng.*, 2004, 63, 281-290.
- [6] Ibarz A., Gonzalez C., Esplugas S.: Rheology of clarified fruit juices, III: Orange juices, *J. Food Engng.*, 1994, 23, 485-494.
- [7] Madejski J.: Przewodnictwo cieplne, Metody pomiaru, II Krajowa Konferencja Kalorymetrii i Analizy Termicznej, Zakopane, JChF, 1976, 5-44.
- [8] Minim L.A., Coimbra J.S.R., Minim V.P.R., Telis-Romer J.: Influence of temperature, water and fat contents on the thermophysical properties of milk, *J. Chem. Engng. Data*, 2002, 47, 1488-1491.
- [9] Panin A.S., Skwiercak W.D.: Ekspres – metod opredieljenja koeficijenta tieploprovodnosti pastoobraznyh i mielkodispersnyh materialow. *Piszczewaja Technologia*, 1974, 1, 140-142.
- [10] Ražnjević K.: Tablice cieplne z wykresami, Warszawa, WNT, 1966.
- [11] Stadelman W.J., Cotterill O.J.: *Egg Science and Technology* (4th ed.). New York: The Haworth Press, Inc., 1995.
- [12] Suk S.K., Santi R.B.: Thermophysical properties of plain yogurt as functions of moisture content, *J. Food Engng.*, 1997, 32, 109-124.
- [13] Telis-Romero J., Gabas A.L., Polizelli M.A., Telis V.R.N.: Temperature and water content influence on thermophysical properties of coffee extract. *Int. J. Food Prop.*, 2000, 3(3), 375-384.
- [14] Telis-Romero J., Telis V.R.N., Gabas A.L., Yamashita F.: Thermophysical properties of brazilian orange juice as affected by temperature and water content, *J. Food Engng.*, 1998, 38, 27-40.
- [15] Vitali A.A., Rao M.A.: Flow behaviour of guava puree as a function of temperature and concentration, *J. Texture Studies*, 1982, 13, 275-289.
- [16] Wei Y.P., Wang C.S., Wu J.S.B.: Flow properties of fruit fillings, *Food Research Int.*, 2001, 34, 377-381.
- [17] Xu Qi Lin S., Chen X.D., Chen Z.D., Bandopadhyay P.: Shear rate dependent thermal conductivity measurement of two fruit juice concentrates, *J. Food Engng.*, 2003, 57, 217-224.
- [18] Zainal B.S., Rahman R.A., Ariff A.B., Saari B.N., Asbi B.A.: Effects of temperature on the physical properties of pink guava juice at the different concentrations, *J. Food Engng.*, 2000, 43, 55-59.

THERMOPHYSICAL AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF YOLK EGG WITH SALT

SUMMARY

The effect of temperature at range 20-60°C on the thermophysical and rheological properties of yolk egg with salt was investigated. Density, specific heat capacity and flow index were independent from temperature, while the thermal conductivity and consistency index essentially decreased with increase in temperature. Equations were fitted to the experimental data for the thermal conductivity and consistency index at investigate range of temperature.