

Dr inż. Iwona SITKIEWICZ
Dr hab. inż. Zbigniew PAŁACHA, prof. SGGW
Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, SGGW w Warszawie

WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE WSADÓW OWOCOWYCH DO JOGURTU®

Badano wpływ temperatury w zakresie 25 – 60°C na właściwości reologiczne wsadów owocowych do jogurtu. Model Sisco najlepiej opisywał krzywe lepkości badanych wsadów owocowych ($R^2 \geq 0,997$). Współczynnik konsystencji obniżał się istotnie wraz ze wzrostem temperatury, natomiast wskaźnik płynięcia był niezależny od temperatury i wyniósł 0,3. Najwyższą wartość energii aktywacji (E_a) posiadał wsad o smaku porzeczek czarnych, wynoszącą 27,88 kJ/mol. Natomiast E_a dla wsadu o smaku brzoskwiń wyniosła 16,18 kJ/mol, a dla wsadu o smaku truskawek 14,82 kJ/mol.

WSTĘP

Wsady owocowe są powszechnie wykorzystywane jako komponenty w wielu recepturach produktów spożywczych [14]. Najbardziej popularne to nadzienia w wyrobach cukierniczych (cukierki, czekolady, pączki, ciastka), lody owocowe, desery oraz jogurty o smaku owocowym.

Przy projektowaniu procesów technologicznych, konstruowaniu maszyn i urządzeń przemysłu spożywczego niezbędne są informacje o właściwościach reologicznych żywności.

Poprawny projekt wymiennika ciepła i dobór właściwych parametrów procesów ogrzewania, chłodzenia, pasteryzacji ciekłych produktów spożywczych wymaga znajomości m.in. parametrów reologicznych (współczynnik konsystencji, wskaźnik płynięcia) [2, 13]. Bardzo ważny jest również wpływ temperatury na proces 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 [1, 13].

Właściwości związane ze zjawiskiem płynięcia to jedne z głównych cech jakościowych konsumenckiej akceptacji wsadów owocowych [6, 9]. Dotychczas większość badań jakości wsadów owocowych skupiała się głównie na zachowaniu ich barwy [11], a właściwości związane z płynięciem były rzadko poruszane. Pratt i in. [11] badali zjawisko płynięcia wsadów owocowych wykorzystując konsystometr Boswicka. Z kolei, Wei i in. [14] badali właściwości reologiczne wsadów reologicznych z dodatkiem różnych hydrokoloidów, głównie gum. W literaturze tematu jest bardzo mało informacji o właściwościach reologicznych wsadów owocowych. W związku z powyższym autorzy pracy podjęli badania zmierzające do poszerzenia danych o właściwościach reologicznych wsadów owocowych.

Celem artykułu jest prezentacja przeprowadzonej pracy badawczo-doświadczalnej dotyczącej wyznaczenia parametrów reologicznych (współczynnika konsystencji i wskaźnika płynięcia) przemysłowych wsadów owocowych do jogurtu w różnej temperaturze.

METODYKA BADAŃ

1. Materiał badawczy

Materiał do badań stanowiły przemysłowe wsady owocowe do jogurtów z kawałkami owoców o smaku: truskawek, brzoskwiń i porzeczek czarnych.

W skład wsadu o smaku truskawek wchodziły: kawałki truskawek (45%), koncentrat soku truskawkowego (0,6%), sacharoza (16%), syrop glukozowo-fruktozowy (19%), skrobia kukurydziana modyfikowana (2%) oraz mączka chleba świętojańskiego, guma ksantanowa, guma guar, kwasek cytrynowy, barwnik (koncentrat soku z czarnej marchwi) i aromat.

W skład wsadu o smaku brzoskwiń wchodziły: kawałki brzoskwiń (40%), przecier brzoskwiniowy (10%), koncentrat soku z maraqui (2,5%), sacharoza (30%), syrop glukozowo-fruktozowy (4%), skrobia kukurydziana modyfikowana (2,3%), skrobia ziemniaczana modyfikowana (0,6%), cytrynian trisodowy (0,27%) oraz mączka chleba świętojańskiego i aromat.

W skład wsadu o smaku porzeczek czarnych wchodziły: przecier jabłkowy (12,5%), sacharoza (20%), syrop glukozowo-fruktozowy (50%), pektyna (0,6%), kwasek cytrynowy (1,2%), cytrynian trisodowy (0,7%) oraz barwnik (antocyjany) i aromat.

2. Metody analityczne

2.1. Oznaczenie zawartości wody

Zawartość wody w badanych materiałach oznaczono metodą suszenia z piaskiem zgodnie z normą PN-84/A-88027.

2.2. Oznaczenie aktywności wody

Aktywność wody wsadów owocowych zmierzono za pomocą miernika aktywności wody Aqua Lab CX-2 (Decagon Devices Inc., USA) w temperaturze $25 \pm 1^\circ\text{C}$. Pomiar wykonano w 3 powtórzeniach.

2.3. Oznaczenie gęstości

Gęstość wsadów owocowych oznaczono metodą piknometryczną [2] w temperaturze 25°C . Próbkę badanych materiałów umieszczano w standardowym piknometrze o pojemności 25 cm^3 i ważono na wadze analitycznej (Metler AE 240S)

z dokładnością $\pm 0,0001$ g. Piknometr poddano cechowaniu na wodzie destylowanej w temperaturze pomiaru. Oznaczenie gęstości wsadów owocowych wykonano w 5 powtórzeniach.

3. Wyznaczenie parametrów reologicznych wsadów owocowych

Parametry reologiczne: współczynnik konsystencji K , oraz wskaźnik płynięcia n wyznaczono z krzywych lepkości w temperaturze 25, 40, 50 i 60°C.

Krzywe lepkości badanych materiałów wyznaczono za pomocą programowanego wiskozymetru Brookfield, model RV DV-III, pracującego w układzie pomiarowym współosiowych cylindrów z wewnętrznym cylindrem SC4-29 w przypadku wsadów o smaku truskawek i brzoskwiń oraz RV 07 dla wsadu o smaku porzeczek czarnych. Badania przeprowadzono przy prędkościach obrotowych cylindra zmieniających się od 5 do 245 RPM co 10 RPM. Krzywe lepkości wykreślono za pomocą programu REOCALC w układzie współrzędnych: lepkość – RPM i wyznaczono parametry reologiczne, opisując je dwoma modelami: potęgowym i Sisco.

Model potęgowy [12]:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

gdzie:

τ - naprężenie ścinające (Pa), K – współczynnik konsystencji ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$), $\dot{\gamma}$ - szybkość ścinania, n – bezwymiarowy wskaźnik płynięcia.

Model Sisco [10]:

$$\eta_a = \eta_\infty + K_s \dot{\gamma}^{n_s - 1} \quad (2)$$

gdzie:

$\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$ - lepkość pozorna ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), η_∞ - lepkość przy nieskończonej szybkości ścinania ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), K_s i n_s – stałe analogiczne do współczynników K i n w równaniu potęgowym.

Parametry reologiczne w obu modelach obliczono wykorzystując program komputerowy Table Curve 2D V3.

Zależność współczynnika konsystencji od temperatury opisano równaniem Arrheniusa [5, 12]:

$$K = K_0 e^{\frac{E_a}{RT}} \quad (3)$$

gdzie:

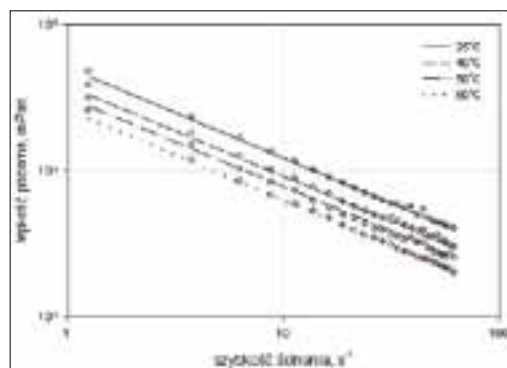
E_a – energia aktywacji (kJ/mol), R – stała gazowa ($R=8,1344$ $\text{J/mol}\cdot\text{K}$), T – temperatura bezwzględna (K), K_0 – stała.

OMÓWIENIE I Dyskusja Wyników

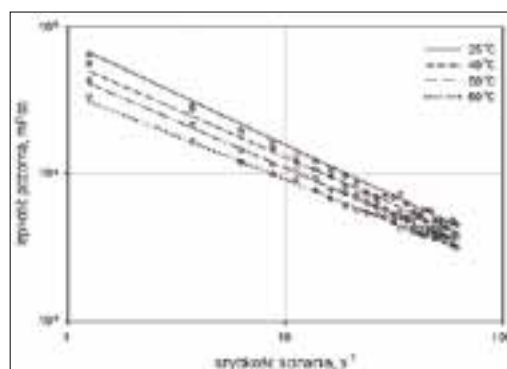
Tabela 1. Zawartość wody, aktywność wody oraz gęstość badanych wsadów owocowych do jogurtu

Parametr	Truskawka	Brzoskwinia	Porzeczka czarna
Zawartość wody (g/100g)	61,32 \pm 0,12	56,64 \pm 0,21	30,46 \pm 0,04
Aktywność wody	0,964 \pm 0,004	0,954 \pm 0,002	0,795 \pm 0,003
Gęstość w $t = 25^\circ\text{C}$ (g/cm^3)	1,096 \pm 0,001	1,069 \pm 0,000	1,256 \pm 0,008

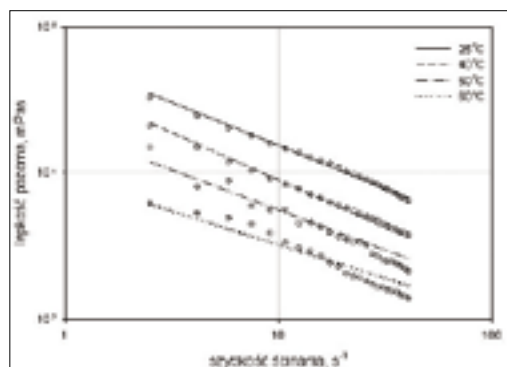
W tabeli 1 przedstawiono zawartość wody, aktywność wody oraz gęstość w temperaturze 25°C badanych wsadów owocowych do jogurtu. Wsady, truskawkowy i brzoskwiński, posiadały zbliżoną zawartość wody, wynoszącą ok. 60%, tym samym, ich wartości aktywności wody i gęstości były na zbliżonym poziomie. Natomiast wsad o smaku porzeczek czarnych posiadał dwukrotnie niższą zawartość wody, konsekwencją czego była o ok. 17% niższa aktywność wody, i w takim samym stopniu, większa jego gęstość.



Rys. 1. Krzywe lepkości wsadu owocowego o smaku truskawek.



Rys. 2. Krzywe lepkości wsadu owocowego o smaku brzoskwiń.



Rys. 3. Krzywe lepkości wsadu owocowego o smaku porzeczek czarnych.

Na rysunkach 1, 2 i 3 przedstawiono wpływ temperatury na przebieg krzywych lepkości badanych wsadów owocowych do jogurtu. Wraz ze wzrostem temperatury lepkość pozorna każdego ze wsadów, przy danej szybkości ścinania, obniżała się, a przebieg krzywych lepkości był typowy dla cieczy nieniuetonowskiej spełniającej prawo potęgowe. W tabelach 2 i 3 przedstawiono parametry reologiczne badanych wsadów owocowych do jogurtu opisane modelem potęgowym (1) oraz modelem Sisco (2).

Tabela 2. Parametry reologiczne badanych wsadów owocowych do jogurtów określone równaniem potęgowym (1)

Temperatura (parametry)	Truskawka	Brzoskwinia	Porzeczka czarna
T = 25°C			
K (Pa s ⁿ)	51,24	78,69	40,70
n	0,38	0,30	0,36
R ²	0,993	0,969	0,995
T = 40°C			
K (Pa s ⁿ)	38,40	57,90	28,58
n	0,38	0,35	0,44
R ²	0,985	0,961	0,964
T = 50°C			
K (Pa s ⁿ)	31,97	47,79	17,29
n	0,39	0,36	0,43
R ²	0,983	0,976	0,930
T = 60°C			
K (Pa s ⁿ)	26,25	35,54	8,26
n	0,38	0,41	0,50
R ²	0,990	0,979	0,858

Tabela 3. Parametry reologiczne badanych wsadów owocowych do jogurtów określone równaniem Sisco (2)

Temperatura (parametry)	Truskawka	Brzoskwinia	Porzeczka czarna
T = 25°C			
η_{∞} (Pa s)	0,598	0,617	1,903
K _s (Pa s ⁿ)	54,49	78,42	54,80
n _s	0,33	0,27	0,37
R ²	0,999	0,999	0,998
T = 40°C			
η_{∞} (Pa s)	0,554	0,534	1,336
K _s (Pa s ⁿ)	43,90	59,05	35,89
n _s	0,31	0,31	0,29
R ²	0,999	0,985	0,999
T = 50°C			
η_{∞} (Pa s)	0,370	0,245	0,306
K _s (Pa s ⁿ)	37,12	51,10	22,32
n _s	0,31	0,32	0,35
R ²	0,999	0,999	0,999
T = 60°C			
η_{∞} (Pa s)	0,448	1,363	*
K _s (Pa s ⁿ)	29,48	40,28	*
n _s	0,30	0,24	*
R ²	0,999	0,997	*

Badane wsady owocowe do jogurtu, w zakresie temperatury 25 – 60°C, są cieczami nieniuetonowskimi rozrzedzanymi ścinaniem, a krzywe ich płynięcia opisane równaniem potęgowym (1) uzyskały współczynniki determinacji 0,858 – 0,995 (tab. 2). Dużo lepsze dopasowanie uzyskano jednak stosując do opisu krzywych lepkości model Sisco (2); wartości współczynnika determinacji były rzędu 0,997 – 0,999 (tab. 3). Współczynnik konsystencji w modelu Sisco, dla każdego z wsadów, obniżał się ze wzrostem temperatury (tab. 3). Najwyższą wartość, wynoszącą 78,42 Pa·sn, osiągnął wsad o smaku brzoskwiń w temperaturze 25°C i obniżył się prawie dwukrotnie w temperaturze 60°C, do wartości 40,28 Pa·sn. Z kolei, współczynnik konsystencji dla wsadu owocowego o smaku truskawek, w analogicznym zakresie temperatury, obniżył się prawie 1,8-krotnie, z wartości 54,49 Pa·sn w 25°C do 29,48 Pa·sn w 60°C. Natomiast dla wsadu owocowego o smaku porzeczek czarnych, K_s zmalała od 54,80 Pa·sn w temperaturze 25°C do 22,32 Pa·sn w temperaturze 50°C (prawie 2,5-krotnie).

Obniżanie się współczynnika konsystencji wraz ze wzrostem temperatury, wpłynie na wzrost prędkości przepływu wsadów owocowych w wymienniku ciepła (mniejsze opory przepływu), a w konsekwencji, czas ogrzewania i przetrzymywania materiału w wyższej temperaturze będzie krótszy.

Zbliżone wartości współczynnika konsystencji dla wsadów owocowych (jabłkowego, cytrynowego, malinowego, borówkowego) otrzymali Wei i in. [14], zawarte w przedziale 52 – 104 Pa·sn w temperaturze 25°C. Natomiast Maceiras i in. [8], badając wybrane dzemy owocowe w zakresie temperatury 20 – 40°C, otrzymali wartości współczynnika konsystencji wynoszące odpowiednio: 37,2 – 7,6 Pa·sn (dżem truskawkowy), 26,0 – 3,8 Pa·sn (dżem brzoskwiniowy), 23,6 – 9,8 Pa·sn (dżem malinowy) i 66,9 – 23,6 Pa·sn (dżem śliwkowy).

Wartości wskaźnika płynięcia (n_s) w modelu Sisco praktycznie nie zależały od temperatury materiału i wahały się od 0,24 do 0,37, a jego wartość średnia dla wszystkich badanych wsadów owocowych kształtowała się na poziomie 0,3. Oznacza to, że badane wsady owocowe utrzymywały charakter cieczy nieniuetonowskiej w badanym zakresie temperatury.

Wei i in. [14], dla badanych wsadów owocowych wymienionych wyżej, otrzymali średnią wartość wskaźnika płynięcia na poziomie 0,4. Guerro i Alzamora [3] badając przeciera owocowe, otrzymali wartości wskaźnika płynięcia 0,5 – 0,7 (przecier brzoskwiniowy), 0,46 – 0,78 (przecier mango), 0,32 – 0,67 (przecier papaja) i 0,41 – 0,64 (przecier bananowy) [4]. Natomiast Nindo i in. [10] dla przeciera borówki wysokiej otrzymali wskaźnik płynięcia w przedziale 0,26 – 0,19.

Wartości lepkości pozornej przy nieskończonej szybkości ścinania malały ze wzrostem temperatury w zakresie od 25 do 50°C dla wszystkich badanych materiałów (tab. 3).

Ze zmianą członu potęgowego w modelu Sisco (2) zmienia się również jednostka w jakiej wyrażony jest wskaźnik konsystencji K_s. Aby można było porównać wartości współczynnika konsystencji badanych wsadów owocowych, obliczono zmodyfikowaną wartość K_s, przyjmując wartość wskaźnika płynięcia równą 0,3 (tab. 4). Dla wszystkich zastosowanych wartości temperatury, najwyższe wartości zmodyfikowanego współczynnika konsystencji stwierdzono dla wsadu owocowego o smaku brzoskwiń.

Tabela 4. Parametry reologiczne badanych wsadów owocowych do jogurtów określone zmodyfikowanym równaniem Sisco (2)

Temperatura (parametry)	Truskawka	Brzoskwinia	Porzeczka czarna
T = 25°C			
η_{∞} (Pa s)	0,598	0,617	1,903
K_s (Pa s ^{0,3})	56,27	78,42	54,80
R ²	0,997	0,999	0,998
T = 40°C			
η_{∞} (Pa s)	0,554	0,534	1,336
K_s (Pa s ^{0,3})	44,47	59,50	35,63
R ²	0,999	0,997	0,999
T = 50°C			
η_{∞} (Pa s)	0,370	0,245	0,306
K_s (Pa s ^{0,3})	37,67	52,10	22,51
R ²	0,998	0,997	0,966
T = 60°C			
η_{∞} (Pa s)	0,448	1,363	*
K_s (Pa s ^{0,3})	29,55	38,21	*
R ²	0,999	0,998	*

Na podstawie wartości zmodyfikowanego współczynnika konsystencji, wykorzystując równanie Arrheniusa (3), obliczono energię aktywacji (E_a) dla przepływu lepkiego, badanych wsadów owocowych. Wartość energii aktywacji zależy od zawartości wody w materiale. Dla wsadów o smaku truskawek i brzoskwiń, posiadających zbliżoną zawartość wody (tab. 1), wartość E_a wyniosła odpowiednio 14,82 kJ/mol i 16,18 kJ/mol. Natomiast dla wsadu o smaku porzeczek czarnych, posiadającego 2-krotnie niższą zawartość wody, E_a osiągnęła praktycznie w tym samym stopniu wyższą wartość, wynoszącą 27,88 kJ/mol.

W dostępnej literaturze brak jest danych na temat wartości E_a dla badanych wsadów owocowych. Tym niemniej, uzyskane w pracy wartości E_a są zbliżone do wyników uzyskanych dla innych produktów owocowych. Nindo i in. [10], dla przecieru borówki wysokiej (10 – 25% s.s.), otrzymali wartości E_a w zakresie 10,7 – 21,7 kJ/mol. Z kolei, Guerrero i Alzamora [3] uzyskali wartości E_a w zakresie 13 – 16 kJ/mol dla przecieru brzoskwiń (25 – 51% s.s.), 24 – 30 kJ/mol dla przecieru mango (28 – 51% s.s.) i 62 kJ/mol dla przecieru papaja (12 – 51% s.s.). Ci sami autorzy [4] dla przecieru bananowego (21 – 51% s.s.) otrzymali wartości E_a od 18,4 do 26,8 kJ/mol. Natomiast, Holdsworth [7], dla przecieru gruszkowego o zawartości ekstraktu 16% otrzymał E_a równą 7,95 kJ/mol.

WNIOSKI

1. Badane wsady owocowe do jogurtu są cieczami nieniu-tonowskimi i ich zachowanie przy przepływie można opisać modelem Sisco będącym połączeniem modelu niu-tonowskiego i potęgowego.

2. Współczynnik konsystencji wsadów owocowych do jogurtu obniżał się istotnie ze wzrostem temperatury w zakresie 25 – 60°C, natomiast wskaźnik płynięcia był niezależny od temperatury i bez względu na rodzaj wsadu, wyniósł 0,3.

3. Najwyższą wartość energii aktywacji posiadał wsad owocowy o smaku porzeczek czarnych, wynoszącą 27,88 kJ/mol. Natomiast wartości E_a dla pozostałych dwóch wsadów były prawie dwukrotnie niższe i wyniosły odpowiednio 16,18 kJ/mol (brzoskwinia) i 14,82 kJ/mol (truskawka).

4. Wyznaczone parametry reologiczne wsadów owocowych do jogurtu wnoszą ważny wkład do bazy danych właściwości reologicznych żywności. Ich znajomość znajdzie bezpośrednie zastosowanie w projektowaniu i eksploatacji wymienników ciepła.

LITERATURA

- [1] BAYINDIRLI L. 1993. *Density and viscosity of grape juice as a function of concentration and temperature*. J. Food Process. Preserv., 17, 147-151.
- [2] CONSTENLA D.T., LOZANO J.E., CRAPISTE G.H. 1989. *Thermophysical properties of clarified apple juice as a function of concentration and temperature*. J. Food Sci., 54(3), 663-668.
- [3] GUERRERO S.N., ALZAMORA S.M. 1998. *Effect of pH, temperature and glucose addition on flow behaviour of fruit puree: II. Peach, papaya, and mango puree*. J. Food Eng., 33, 239-256.
- [4] GUERRERO S.N., ALZAMORA S.M. 1997. *Effect of pH, temperature and glucose addition on flow behaviour of fruit puree: I. Banana puree*. J. Food Eng., 32, 77-101.
- [5] HAMINIUK C.W.I., SIERAKOWSKI M.R., VIDAL J.R.M.B., MASON M.L. 2006. *Influence of temperature on the rheological behaviour of whole araca pulp (Psidium cattleianum sabine)*. Lebensm. –Wiss. u. – Technol., 39 426-430.
- [6] HILL M.A., MITCHELL J.R., HERMAN P.A. 1995. *The relationship between the reological and sensory properties of a lemon pie filling*. J. Texture Studies, 26, 457-470.
- [7] HOLDSWORTH S.D. 1993. *Rheological models used for the prediction of the flow properties of food products: A literature review*. Trans. Instit. Chem. Eng., 71C, 139-179.
- [8] MACEIRAS R., ALVAREZ E., CANCELA M.A. 2007. *Rheological properties of fruits puree: Effect of cooking*. J. Food Eng., 80, 763-769.
- [9] MOSKOWITZ H.R., KRIEGER B. 1995. *The contribution of sensory wiking to overall wiking: an analysis of six food categories*. Food Quality and Preference, 6, 83-90.
- [10] NINDO C.I., TANG J., POWERS J.R., TAKHAR P.S. 2007. *Rheological properties of blueberry puree for processing applications*. Lebensm. –Wiss. u. – Technol., 40, 292-299.
- [11] PRATT H.F., SISTRUNK W.A., MORRIS J.R. 1986. *Factors influencing the quality of canned strawberry filling during storage*. J. Food Process. Preserv., 10, 215-226.
- [12] RAO M.A., ANANTHESWARAN R.C. 1982. *Rheology of fluids in food processing*. Food Technol., 36(2), 116-126.
- [13] VITALI A.A., RAO M.A. 1982. *Flow behaviour of guava puree as a function of temperature and concentration*. J. Texture Studies, 13, 275-289.
- [14] WEI Y.P., WANG C.S., WU J.S.B. 2001. *Flow properties of fruit fillings*. Food Research Int., 34, 377-381.

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF FRUIT FILLINGS TO YOGHOURTS

SUMMARY

The effect of temperature at range 25 – 60°C on the rheological properties of fruit fillings to yoghourts was investigated. The Sisco model fits the best ($R^2 \geq 0,0997$) the shear rate and apparent viscosity data. The consistency index essentially decreased with increase in temperature, while the flow index was independent from temperature (average value 0,3). The highest activation energy of flow 27,88 kJ/mol had a black-currant filling, whereas E_a for peach and strawberry fillings was 16,18 and 14,82 kJ/mol, respectively.