

Pozderović A.<sup>1</sup>, Anita Pichler<sup>1</sup>, Moslavac T.<sup>1</sup>

Znanstveni rad

## Utjecaj brzine smicanja na reološka svojstva kaše jabuke pri niskim temperaturama

### Sažetak

Poznavanje reoloških svojstava hrane od velike je važnosti za postizanje određenih svojstava hrane i za vođenje procesa pri proizvodnji hrane. Tekstura je jedan od značajnijih čimbenika koji određuju kakvoću namirnica, pa tako i onih kojima se zamrzavanjem želi očuvati veća stabilnost tijekom vremena. Cilj rada bio je istraživanje utjecaja brzine smicanja i kontinuiranog hlađenja na reološka svojstva kaše jabuke pri niskim temperaturama prije zamrzavanja i tijekom zamrzavanja. Istraživanja su provedena s kašom jabuke sorte Idared. Mjerenja reoloških svojstava provedena su na rotacijskom viskozimetru Rheotest 3 s kriostatskom jedinicom. Reološka svojstva ispitivane kaše određena su mjerenjem i grafičkim prikazom ovisnosti smičnog naprezanja i brzine smicanja pri 10 °C te izračunavanjem koeficijenta konzistencije i indeksa tečenja. Također je mjerena ovisnost smičnog naprezanja i prividne viskoznosti o temperaturi kod kontinuiranog hlađenja pri konstantnoj brzini smicanja. Određena je temperatura nakon koje dolazi do naglog povećanja smičnog naprezanja i manje brzine snižavanja temperature ( $T_k$ ), kao i najniža temperatura pothlađivanja kod koje još dolazi do smicanja ( $T_m$ ). Ispitivanja su pokazala da reološka svojstva kaše jabuke pri niskim temperaturama tijekom kontinuiranog hlađenja i temperature  $T_k$  i  $T_m$  ovise o brzini smicanja. Hlađenjem ispitivane kaše jabuke u području zamrzavanja dolazi do pothlađivanja kaše do temperature ( $T_m$ ) koja je ovisila o brzini smicanja. Značajne su promjene reoloških svojstava kaše jabuke u području pothlađivanja zbog nastajanja kristala leda kao novih krutih čestica i njihovog rasta, a zapažene su pri temperaturama od -5,55 do -10,50 °C, ovisno o brzini smicanja.

**Cljučne riječi:** kaša jabuke, reološka svojstva, brzina smicanja, niske temperature

### Uvod

Poznavanje reoloških svojstava hrane važno je u izvedbi procesa tečenja, kontroli kvalitete tijekom proizvodnje i skladištenja, mjerenju stabilnosti procesa, razumijevanju teksture i za utvrđivanje potrebitih procesnih parametara (Davis, 1973.; De Man i sur., 1975.; Kokini, 1987.; Dziejak, 1991.; Vitali i Rao, 1984.). Reološka svojstva hrane pri niskim temperaturama, a posebno u fazi zamrzavanja, važna su zbog provedbe i unapređenja procesa zamrzavanja hrane.

Do sada su provedena brojna istraživanja reoloških svojstava hrane pri niskim temperaturama, ali ne i u fazi zamrzavanja nakon početne temperature zamrzavanja. Istraživan je utjecaj kemijskog sastava, različitih dodataka, temperature skladištenja, efekt

<sup>1</sup> **Andrija Pozderović**, prof. dr. sc., e-mail: [Andrija.Pozderovic@ptfos.hr](mailto:Andrija.Pozderovic@ptfos.hr), 031/224-313;  
**Anita Pichler**, dipl. ing., **Tihomir Moslavac**, doc. dr. sc., Prehrambeno-tehnološki fakultet  
Osijek, Franje Kuhača 20, 31000 Osijek

**Tablica 1.** Ovisnost temperature  $T_k$  i  $T_m$ , vremena  $t_k$  i  $t_m$  o različitim brzinama smicanja za kašu jabuke, pri kontinuiranom hlađenju.

**Table 1.** Different shear rate dependence of temperatures  $T_k$  and  $T_m$  as well as times of cooling  $t_k$  and  $t_m$  for apple puree at continuous cooling.

BROJ I NAZIV UZORKA	$D/s^{-1}$	$T_k/^\circ C$	$T_m/^\circ C$	$t_k/min.$	$t_m/min.$
1. Kaša jabuke	1,499	- 7,25	- 10,5	47,0	61,0
1. Kaša jabuke	5,399	- 7,15	- 8,9	46,0	54,0
1. Kaša jabuke	24,331	- 5,35	- 7,7	40,5	50,2
1. Kaša jabuke	121,488	- 6,40	- 6,8	44,0	45,3
1. Kaša jabuke	437,289	- 5,55	- 5,8	41,0	42,2

$T_k$  - temperatura nakon koje dolazi do naglog povećanja smičnog naprezanja i manjeg snižavanja temperature,  $^\circ C$

$T_m$  - najniža temperatura pothlađivanja pri kojoj još dolazi do smicanja,  $^\circ C$

$t_k, t_m$  - vrijeme hlađenja za koje se postiže temperatura  $T_k$  i  $T_m$ , min.

zamrzavanja i odmrzavanja te utjecaj procesnih parametara na reološka svojstva hrane (Hegedušić i sur., 1991.; Hegedušić i sur., 1994.; Hegedušić i sur., 1995.; Hegedušić i Lovrić, 1990.; Ibarz i Segales, 1995.; Qui i Rao, 1988.; Ramaswamy, Basak i Voort, 1994., Suely i sur., 1996.; Rao i sur., 1986.). Rao i sur. istraživali su reološka svojstva kaše jabuke, proučavali su utjecaj obrade jabuke, čvrstoće i procesnih parametara na tip tekućine, indeks tečenja i koeficijent konzistencije. Odredili su djelovanje udjela pulpe i veličine čestica na prividni viskozitet kaše jabuke kod brzine smicanja  $100 s^{-1}$  pri temperaturi  $25^\circ C$ . U navedenim radovima primijenjena je metoda mjerenja ovisnosti smičnog naprezanja o brzini smicanja kod pojedinih konstantnih temperatura. Za razliku od toga, u ovom je radu provedeno mjerenje ovisnosti smičnog naprezanja o temperaturi tijekom hlađenja kod konstantne brzine smicanja.

Osim topljivih sastojaka i udjela vode, na reološka svojstva kaše jabuke utječe i udio, veličina i razdioba krutih čestica. Tijekom zamrzavanja tih sustava nastaju kristali leda kao nove krute čestice u sustavu te se povećava koncentracija otopljenih tvari u intersticijalnoj otopini. Dinamika tih promjena ovisi o procesnim parametrima i sastavu sustava, promjene su kontinuirane sve do prelaska sustava iz polutekućeg stanja u kruto stanje.

U ovom je radu istraživana utjecaj brzine smicanja kod kontinuiranog hlađenja (konstantna brzina hlađenja) na reološka svojstva kaše jabuke pri niskim temperaturama prije zamrzavanja i tijekom zamrzavanja do temperature  $T_m$  na kojoj sustav još ima viskozna svojstva.

Ispitivan je utjecaj nastalih kristala leda i uvjeta njihovog nastajanja na reološka svojstva kaše jabuke tijekom zamrzavanja.

---

## **Materijal i metode**

Istraživanja su provedena s kašom jabuke sorte Idared. Kriške jabuke su nakon blanširanja pasirane na laboratorijskoj pasirci te je tako dobivena kaša korištena za istraživanje.

Mjerenja su provedena pomoću rotacijskog viskozimetra RHEOTEST 3 (WEB MLW, Njemačka) primjenom sustava koncentričnih cilindara. Za ohlađivanje uzorka do temperature zamrzavanja korišten je optočni tekućinski termostat (Ultra-Kryostat MK 70, MLW) s uređajem za precizno reguliranje i održavanje temperature od 60 °C do -30 °C (maks. odstupanje temp. ± 0,02 °C).

Reološka svojstva ispitivanih kaša određena su praćenjem ovisnosti smičnog napreznja ( $t$ ) i brzine smicanja ( $D$ ) pri temperaturi 10 °C. Na osnovi te ovisnosti  $t/D$  određen je tip tekućine te je utvrđeno da su sve kaše jabuke imale pseudoplastična svojstva.

Stoga je za izračun reoloških parametara koeficijenta konzistencije ( $k$ ) i indeksa tečenja ( $n$ ) primijenjen Ostwald-Reinerov "stupnjeviti zakon":

$$t = k \cdot D^n$$

$t$  - smično naprezanje, Pa (shear stress, Pa)

$k$  - koeficijent konzistencije, Pa  $\times$  s <sup>$n$</sup>  (consistency coefficient, Pa  $\times$  s <sup>$n$</sup> )

$D$  - brzina smicanja, s<sup>-1</sup> (shear rate, s<sup>-1</sup>)

$n$  - indeks tečenja (flow index)

Izračunavanje prividnog viskoziteta obavljeno je primjenom izraza:

$$m = k \cdot D^{(n-1)}$$

$m$  - prividna viskoznost, Pa  $\times$  s (apparent viscosity, Pa  $\times$  s)

Utjecaj brzine smicanja na reološka svojstva kaše jabuke tijekom hlađenja istraživan je mjerenjem ovisnosti smičnog napreznja i prividnog viskoziteta o temperaturi tijekom hlađenja kod konstantnih brzina smicanja.

Primijenjena je konstantna brzina hlađenja (kontinuirano hlađenje) tako da se kaša jabuke hladila konstantnom brzinom hlađenja od 10 °C do temperature zamrzavanja sustava, tj. do najniže temperature pothlađivanja pri kojoj je još dolazilo do smicanja ( $T_m$ ).

Temperatura, smično naprezanje ( $t$ ) i prividni viskozitet ( $m$ ) očitavani su od temperature 10 °C do 0 °C svake minute, a od 0 °C do temperature na kojoj dolazi do naglog porasta vrijednosti smičnog napreznja ( $T_k$ ) svakih 30 sekundi. U periodu od temperature  $T_k$  do  $T_m$  navedeni su parametri očitavani svakih 15 sekundi na displeju viskozimetra.

Tijekom konstantne brzine hlađenja utvrđena je temperatura nakon koje dolazi do naglog povećanja smičnog napreznja i manje brzine snižavanja temperature ( $T_k$ ), kao

i najniža temperatura pothlađivanja kod koje još dolazi do smicanja ( $T_m$ ).

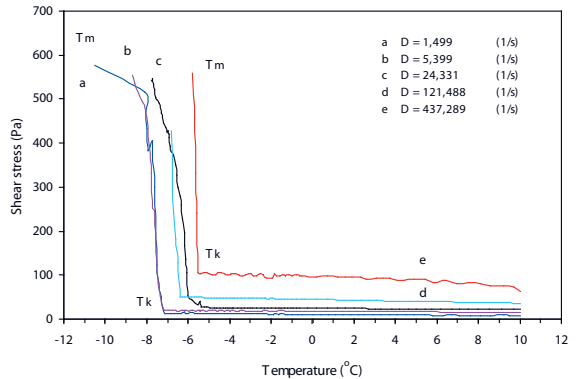
Sva su mjerenja provedena dva puta i prikazani podatci predstavljaju srednje vrijednosti.

### Rezultati i rasprava

Na osnovi rezultata provedenih reoloških mjerenja pri 10 °C utvrđeno je da je ispitivana kaša jabuke pseudoplastična nennewtonovska tekućina kod koje s porastom brzine smicanja raste i smično naprezanje, a vrijednosti za indeks tečenja su manje od 1.

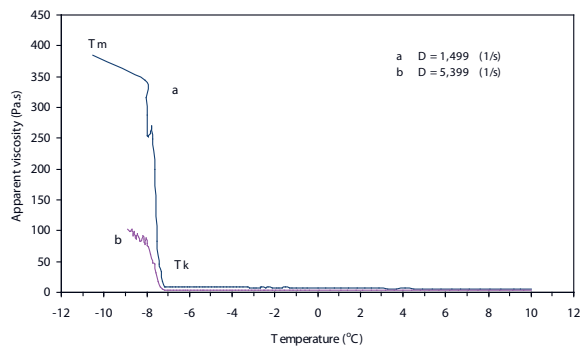
Rezultati istraživanja utjecaja različitih brzina smicanja [1,499 s<sup>-1</sup>, 5,399 s<sup>-1</sup>, 24,331 s<sup>-1</sup>, 121,488 s<sup>-1</sup>, 437,289 s<sup>-1</sup>] na temperature  $T_k$  i  $T_m$ , vremena  $t_k$  i  $t_m$ , smično naprezanje i prividni viskozitet za kašu jabuke, pri kontinuiranom hlađenju prikazani su u tablici 1 i na slikama 1, 2, 3.

Ovisnost smičnog naprezanja o temperaturi tijekom kontinuiranog hlađenja kaše jabuke kod pet različitih brzina smicanja prikazana je na slici 1. Iz podataka prikazanih na slikama 1, 2 i 3 vidi se da hlađenjem kaše jabuke od 10 °C na niže smično naprezanje i prividni viskozitet ovise o brzini smicanja i temperaturi. Međutim smično naprezanje i prividni viskozitet se ne mijenjaju bitno sve do temperature  $T_k$ . Pri temperaturi  $T_k$  naglo se povećava smično naprezanje i prividni viskozitet. Naglo povećanje smičnog naprezanja i prividnog viskoziteta pri temperaturi  $T_k$  nastaje zbog početka smrzavanja kaše. Početkom zamrzavanja kaše nastaju kristali leda kao nove krute čestice u sustavu i povećava se udio suhe tvari u intersticijalnoj tekućini zbog čega se naglo povećava smično naprezanje i prividni viskozitet. Daljnjim hlađenjem temperatura se sporije snižava do najniže temperature pothlađivanja  $T_m$  pri kojoj još dolazi do smicanja. Pri toj je temperaturi udio kristala leda toliki



**Slika 1.** Ovisnost smičnog naprezanja ( $\tau$ ) o temperaturi tijekom kontinuiranog hlađenja kaše jabuke, pri različitim brzinama smicanja ( $D$ ).

**Fig. 1** Shear stress ( $\tau$ ) temperature dependence during continuous cooling of apple puree at different shear rates ( $D$ ).



**Slika 2.** Ovisnost prividnog viskoziteta ( $\eta$ ) o temperaturi tijekom kontinuiranog hlađenja kaše jabuke, pri različitim brzinama smicanja ( $D$ ).

**Fig. 2** Apparent viscosity ( $\eta$ ) temperature dependence during continuous cooling of apple puree at different shear rates ( $D$ ).

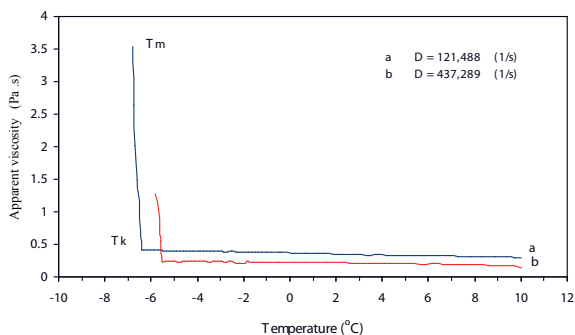
da sustav gubi viskozna svojstva i poprima plastična svojstva. Nakon te temperature više nije bilo moguće mjeriti smično naprezanje i prividni viskozitet. Daljnjim hlađenjem dolazi do potpunog skrućivanja sustava. Iz podataka u tablici 1 i slikama 1, 2 i 3 vidi se da temperature  $T_k$  i  $T_m$  te vrijeme za koje se postižu te temperature ovisi o brzini smicanja. Pri manjim brzinama smicanja postižu se niže temperature  $T_k$  i  $T_m$  (tablica 1). Pri manjim je brzinama smicanja ( $1.499 \text{ s}^{-1}$ ) temperatura  $T_m$  bila  $-10.5 \text{ }^\circ\text{C}$ , a pri najvećoj je brzini smicanja ( $437.289 \text{ s}^{-1}$ ) bila  $-5.8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pri manjoj brzini smicanja manja je brzina mijenjanja kaše pa je manja brzina odvođenja topline, što rezultira duljim vremenom hlađenja do temperature  $T_k$  i  $T_m$  (tablica 1). Iz navedenih se podataka također vidi da pri većim brzinama smicanja nema bitne razlike između temperatura  $T_k$  i  $T_m$  dok je pri manjim brzinama smicanja ta razlika 2 do  $3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Podatci na slici 3 pokazuju da je pri manjoj brzini smicanja u trenutku postizanja temperature  $T_k$  i  $T_m$  bio veći prividni viskozitet ( $3.6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ), nego pri većoj brzini smicanja ( $1.3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ). Razlog tome je što se pri većoj brzini smicanja brže odvodila toplina, pri čemu je nastao veći broj sitnih kristala leda koji pružaju manji otpor smicanju nego krupniji kristali leda nastali kod manjih brzina smicanja i sporijeg odvođenja topline.

### Zaključak

Hlađenjem kaše jabuke smično naprezanje i prividni viskozitet naglo se povećavaju nakon početka zamrzavanja kaše na temperaturi  $T_k$ . Naglo povećanje smičnog naprezanja i prividnog viskoziteta na temperaturi  $T_k$  javlja se zbog nastajanja kristala leda i povećanja viskoziteta intersticijalne tekućine.

Tijekom zamrzavanja kaša zadržava viskozna svojstva do najniže temperature pothlađivanja  $T_m$  kod koje još dolazi do smicanja. Nakon  $T_m$  kaša ima plastična svojstva sve do potpunog skrućivanja (zamrzavanja).

Temperature  $T_k$  i  $T_m$  i vrijeme za koje se postižu kod ostalih konstantnih uvjeta ovise o brzini smicanja. Pri manjoj brzini smicanja niže su temperature  $T_k$  i  $T_m$  i potrebno je dulje vrijeme da se postignu. Pri većoj brzini smicanja nema značajne razlike između temperatura  $T_k$  i  $T_m$ . Pri manjoj brzini smicanja, zbog nastajanja krupnijih kristala leda, veći je prividni viskozitet kaše jabuke pri temperaturama  $T_k$  i  $T_m$ .



**Slika 3.** Ovisnost prividnog viskoziteta ( $m$ ) o temperaturi tijekom kontinuiranog hlađenja kaše jabuke, pri različitim brzinama smicanja ( $D$ ).

**Fig. 3** Apparent viscosity ( $m$ ) temperature dependence during continuous cooling of apple puree at different shear rates ( $D$ ).

## Scientific study

## Shear rate influence of rheological properties of apple puree at low temperatures

### Summary

The knowledge of rheological properties is very important either for achieving specific food properties, or for designing production procedure. The texture is one of the significant factors, which specifies the quality of foodstuffs, including those, which are kept by freezing in order to preserve their stability for a longer period. The aim of this work was to investigate an influence of shear rate and continuous cooling on rheological properties of apple puree at low temperatures before freezing and during the process of freezing. Investigation was carried out with apple puree of Idared sort. Measurements of the rheological properties were made by a rotary viscosimeter Rheotest 3 with the refrigerating unit. The rheological properties of purees were measured and shown by graphic representation showing relation between shear stress and shear rate at the temperature of 10°C and by calculating the consistency coefficient and flow behaviour index.

The relation between shear stress, temperature and cooling rate was also measured at the constant shear rate. The temperature was measured at which shear stress increases and the temperature ( $T_k$ ) falls. The lowest temperature of cooling at which the shear ( $T_m$ ) is still present was also measured. The examinations showed that at low temperatures the rheological properties of apple puree depended of shear rate. If the apple purees were cooled at a freezing temperature, their temperature ( $T_m$ ) depended of the shear rate. There were some significant changes of rheological properties of apple puree while being cooled due to ice crystals formation and growth. They were formed as solid particles and observed at temperatures ranging from - 5.55 to - 10.50°C depending on the shear rate.

**Key words:** apple puree, rheological properties, shear rate, low temperatures

Reološki su parametri kaše jabuke pri temperaturi 10 °C: k - koeficijent konzistencije 7.83 (Pa · s<sup>n</sup>), n - indeks tečenja 0.32 , R<sup>2</sup> - koeficijent korelacije 0.985, tip tekućine - pseuodoplastična.

### Literatura

- Davis, S.S. (1973.). Rheological properties of semi-solid foodstuffs. Journal of Texture Study 4: 15-40.
- DeMan, J.M., Voisey, P.W., Rasper, V.F., Stanley, D.W. (1975.). Rheology and texture in food quality, Avi publishing Company INC Westport
- Dziezak, J. D. (1991.). A focus on gums, Food Technology 45:118-131.
- Kokini J.L. (1987.). The physical basis of liquid food texture and texture-taste interactions, Journal of Food Engineering 6: 51-81.
- Hegedušić, V., Carić, M., Herceg, Z., Rade, D. (1995.). Rheological and thermophysical properties of dairy desserts before and after freezing. Mljekarstvo 45: 191-203.
- Hegedušić, V., Lovrić, T. (1990.). Utjecaj smrzavanja i temperature skladištenja na reološka svojstva kašastih proizvoda od jabuke. Kemija u Industriji 39: 377-381.
- Hegedušić, V., Piližota, V., Šubarić, D. (1994.). Rheological and thermophysical properties of model ice cream

---

mixtures. *Prehrambeno-tehnološka i biotehnološka revija* 32: 67-70.

**Ibarz, A., Segales, J. (1995.)**. Influence of freezing on rheology of salted egg yolk. *Acta Alimentaria* 266: 69-76.

Pozderović, A., Moslavac, T., Pichler, A. (2005.). Utjecaj udjela suhe tvari na reološka svojstva kaše jabuke pri niskim temperaturama prije i tijekom smrzavanja. *Kemija u Industriji* 54: 341–346.

Qiu, C.G., Rao, M. A. (1988.). Role of pulp content and particle size in yield stress of apple sauce. *Journal of Food Science* 53: 1165-1170.

Ramaswamy, H. S., Basak, S., van de Voort, F. R. (1994.). Effect of strawberry concentrate on applesauce rheology. *Canadian Agricultural Engineering* 36:109–115.

Rao, M.A., Cooley, H.J., Noguiera, J.N., McLellan, M.R. (1986.). Rheology of Apple Sauce: Effect of Apple Cultivar, Firmness, and Processing Parameters. *Journal of Food Science* 51: 176-179.

Suely, S. P., Da Silva, F. C., Largo, R. C. A., Qassim, R. Y. (1996.). Rheological behaviour of processed avocado pulp emulsion, *International Journal of Food Technology* 31: 319-325.

**Vitali, A. A., Rao, M. A. (1984.)**. Flow Properties of Low-Pulp Concentrated Orange Juice: Serum Viscosity and Effect of Pulp Content. *Journal of Food Science* 49: 876-881.