



UDK: 621.784.8

## PRIMENA UPROŠĆENIH TERMODINAMIČKIH METODA ODREĐIVANJA VREMENA HLAĐENJA NA PRIMERU TEHNOLOGIJE PRIPREME JOGURTA DVOFAZNYM HLAĐENJEM

<sup>1</sup>Ivan Zlatanović, <sup>2</sup>Franc Kosi<sup>1</sup>Poljoprivredni fakultet - Beograd<sup>2</sup>Mašinski fakultet - Beograd

**Sadržaj:** Dobra procena vremena hlađenja i zamrzavanja može obezbediti efikasniji i ekonomičniji rad rashladne instalacije za postavljene tehnološke zahteve. U ovom radu predstavljene su neke od najčešće primenjivanih metoda za predviđanje vremena hlađenja i zamrzavanja u projektantskoj praksi. Na primeru prve faze tehnologije konzervacije jogurta dvofaznim hlađenjem razmotreno je jedno tehničko rešenje komore za brzo rashlađivanje sa aspekta mogućnosti izbora adekvatne metode termodinamičkog proračuna vremena hlađenja prema odgovarajućoj tehnološki zahtevanoj dinamici hlađenja.

**Ključne reči:** vreme hlađenja i zamrzavanja, metode, predviđanje, prostiranje toplote, jogurt.

### 1. UVOD

Hlađenjem i zamrzavanjem namirnica, kao metodama konzerviranja, postižu se niske temperature koje redukuju mikrobiološku aktivnost mikro-organizama i enzima, čime se uspešno čuva kvalitet namirnica. Međutim, kako bi postupak hlađenja i zamrzavanja bio što efikasniji i ekonomičniji, rashladna instalacija mora biti takva da istovremeno obezbedi i postavljene tehnološke zahteve i energetski efikasan rad. Da bi ovakav način konzervacije bio rentabilan komponente rashladne instalacije treba projektovati i birati za specifične zahteve (uslove) u toku procesa hlađenja ili smrzavanja.

Dobra procena vremena hlađenja i zamrzavanja može obezbediti ovakve zahteve jer direktno utiče na rashladni kapacitet instalacije. Postoje brojne metode za određivanje vremena hlađenja i smrzavanja namirnica (numeričke, analitičke i empirijske, CFD metode, ... [5]) tako da je projektant suočen i sa problemom izbora odgovarajuće metode za proračun vremena hlađenja i smrzavanja u zavisnosti od konkretnog problema.

## 2. TEORIJSKA RAZMATRANJA

Tokom odvijanja procesa hlađenja i zamrzavanja toplota se odvodi iz toplijih unutrašnjih (centralnih) slojeva namirnice (proizvoda) i prolazeći kroz sve ostale slojeve predaje okolnoj hladnijoj sredini (vazduh, voda, ...) direktno ili kroz pakovanje-ambalažu (zid plastične čaše, kartonsku kutiju, celofan, i sl.). Vreme procesa hlađenja i zamrzavanja zavisi od termofizičkih osobina namirnice i ambalaže od kojih su najvažnije toplotna provodljivost, gustina i specifični toplotni kapacitet, kao i od oblika pakovanja. Ovo vreme se najčešće definiše kao vreme potrebno da centralni deo proizvoda dostigne željenu temperaturu. Kod pakovanja proizvoda složenog geometrijskog oblika brzina hlađenja najdebljih (ili najtanjih) delova upakovanog proizvoda može biti tehnološki zahtevana. Kod namirnice sa pakovanjem jednostavnih dimenzija i geometrije brzina hlađenja (zamrzavanja) svih delova biće približno jednaka.

Kada je otpor provođenja toplote (kondukcija) kroz unutrašnje slojeve namirnice zanemarljivo mali u odnosu na otpor prelaza toplote (konvekcija) sa površinskih slojeva namirnice na okolnu sredinu, kompletan proizvod će biti uniformne temperature i određivanje vremena hlađenja biće krajnje jednostavno, obzirom na to da će temperatura proizvoda i toplotno opterećenje eksponencijalno opadati tokom vremena. Ovaj odnos kondukcije i konvekcije je definisan Biot-ovim ( $Bi$ ) bezdimenzionim brojem:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (1)$$

gde su:  $\alpha$  - koeficijent prelaza toplote,  $\lambda$  - koeficijent provođenja toplote,  $L$  - karakteristična dužina [2,3].

Pri projektovanju bilo kog rashladnog postrojenja od velikog je značaja da inženjer bude svestan veličine  $Bi$  broja toplotnog procesa koji razmatra. Određivanje  $Bi$  je od fundamentalne važnosti prilikom posmatranja bilo kog slučaja prostiranja toplote kroz čvrsta tela. Unutrašnji otpor provođenju toplote može se zanemariti ukoliko je  $Bi \ll 1$  (uniformno temperatursko polje). Ukoliko je  $Bi \gg 1$  unutrašnji otpor provođenju toplote je uticajan faktor u procesu prostiranja toplote, tako da bi u ovom slučaju smanjenje debljine ambalaže ili povećanje brzine opstrujavanja manje uticalo na brzinu hlađenja, dok bi veći uticaj imalo smanjenje veličine čitavog pakovanja (ukoliko je to naravno moguće). Za vrednosti  $0,1 < Bi < 40$  se u obzir moraju ravnopravno uzeti vrednosti koeficijenta  $\alpha$  i  $\lambda$ , pri čemu se problem određivanja vremena hlađenja znatno usložnjava i analitički je rešiv samo za pravilne geometrijske oblike [2].

## 3. UPROŠĆENE METODE ODREĐIVANJA VREMENA HLAĐENJA (ZAMRZAVANJA)

Svaka od uprošćenih metoda određivanja metoda ima za cilj da predvidi vreme ohlađivanja (zamrzavanja) namirnice uzimajući u obzir geometrijski oblik (pravilan ili nepravilan) proizvoda i široki spektar vrednosti  $Bi$  broja. Ove metode se mogu podeliti u dve kategorije: (A) metode zasnovane na  $f$  i  $j$  faktorima (pravilni ili nepravilni geometrijski oblici) i (B) metode zasnovane na korišćenju faktora oblika "equivalent heat transfer dimensionality" [2]. Pored ovih metoda u praksi se često koriste i numeričke metode (konačnih razlika, konačnih elemenata i konačnih zapremina), razne CFD metode, itd.

### 3.1. Uprošćeno određivanje vremena hlađenja

Kada se čvrsto telo hladi od neke uniformne početne (inicijalne) temperature  $T_i$  u medijumu (ambijentu) konstantne temperature  $T_a$ , temperatura  $T$  u bilo kojoj tački tela (pa i u centru namirnice) podleže zavisnosti definisanoj jednačinom (2):

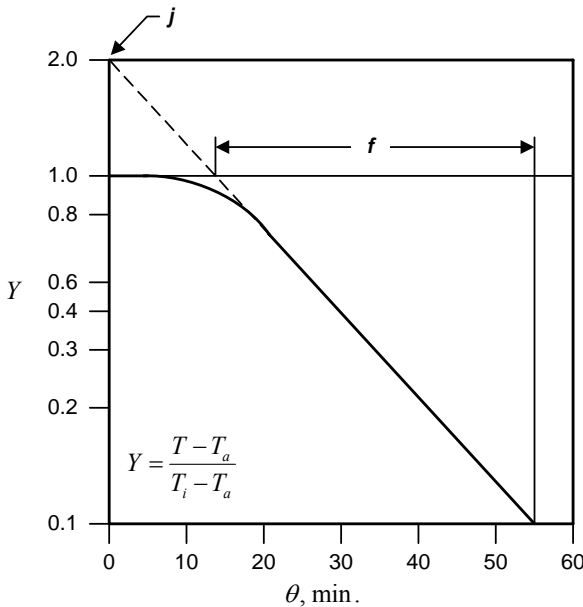
$$\frac{T - T_a}{T_i - T_a} = j \cdot e^{\frac{-2.303 \cdot \theta}{f}} = Y, \tag{2}$$

gde su  $f$  i  $j$  faktori koji opisuju nagib i prekid krive procesa hlađenja, respektivno, sastavljene iz jednog linearnog dela i dela koji eksponencijalno opada i koji je karakterističan za početak procesa hlađenja (slika 1).

Na osnovu jednačine (2) može se lako izračunati vreme hlađenja ( $\theta$ ):

$$\theta = \frac{-f}{2.303} \ln\left(\frac{Y}{j}\right) \tag{3}$$

Faktor  $j$  je mera koja prati eksponencijalno opadanje temperature u početku procesa hlađenja, dok faktor  $f$  pokazuje vreme potrebno za dobijanje 90% smanjenja bezdimenzione temperaturske razlike ( $Y$ ). Grafički prikazano  $f$  faktor se podudara sa vremenom za linearni deo krive produžen do linije  $Y = 1.0$ . Za razliku od  $j$  faktora koji zavisi od položaja tela,  $f$  faktor ostaje konstantan pri bilo kom položaju.



Slika 1. Kriva procesa hlađenja sa grafičkim prikazom  $f$  i  $j$  faktora

Za osnovne geometrijske oblike tela (ploča, cilindar i sfera) u literaturi se mogu pronaći izvedene jednačine za određivanje  $f$  i  $j$  faktora kao i dijagrami za njihovo grafičko određivanje. Kod tela kompleksnog i nepravilnog oblika postoje dva pristupa u predviđanju vremena hlađenja [2,3].

Prvi pristup podrazumeva da se telo kompleksnog oblika aproksimira (idealizuje) njemu najbližijim osnovnim geometrijskim oblikom.

Drugi pristup podrazumeva pokušaj da se vrednosti  $f$  i  $j$  faktora odrede empirijskim relacijama koje će se formirati u zavisnosti od konkretnog slučaja i geometrije tela. Tako na primer prema Smith-u [2,4]  $f$  i  $j$  faktori zavise od "geometrijskog indeksa  $G$ " i karakteristične vrednosti  $M_1^2$  koji se dobijaju prema relacijama (4) i (5):

$$G = 0.25 + \frac{3}{8} \pi^2 L^4 \left( \frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2} \right) \quad (4)$$

$$\ln(M_1^2) = f(X_g, X_b) \quad (5)$$

$$X_g = \ln(G) \quad (6)$$

$$X_b = \ln\left(\frac{1}{Bi}\right) \quad (7)$$

gde su:  $L$  - najkraće rastojanje između centra i površine namirnice;  $A_1$  - površina minimalnog poprečnog preseka koji sadrži  $L$ ;  $A_2$  - površina poprečnog preseka koji je ortogonalan na  $A_1$  i sadrži  $L$ . Na osnovu relacija (4), (5), (6), (7) i (1) sada se mogu odrediti vrednosti  $f$  faktora (8) i  $j$  faktora (9):

$$f = \frac{2.303 \cdot L^2 \cdot \rho \cdot c}{M_1^2 \cdot \lambda} \quad (8)$$

$$j = 0.892 \cdot e^{-0.0388 \cdot M_1^2} \quad (9)$$

gde su:  $\rho$  - gustina namirnice;  $c$  - specifični toplotni kapacitet namirnice;  $\lambda$  - koeficijent provođenja toplote.

Proračun vremena hlađenja se može izvesti i uzimanjem uticaja geometrije namirnice na vreme hlađenja preko  $E$  faktora oblika, tzv. "Equivalent Heat Transfer Dimensionality shape factor" (u literaturi [2,3,4] *EHTD* faktor). Ovim faktorom se poredi ukupni toplotni fluks sa toplotnim fluksom putem najkraće dimenzije proizvoda.

Prema Lin-u [4] za namirnice nepravilnog oblika vreme hlađenja se može odrediti prema relaciji:

$$\theta = \frac{3 \cdot \rho \cdot c \cdot L^2}{\omega^2 \cdot \lambda \cdot E} \ln\left(\frac{j}{Y}\right) \quad (10)$$

gde su:  $L$  - poluprečnik ili polovina debljine proizvoda;  $\omega$  - prvi koren u radijanima transcendentne funkcije (11);  $E$  - faktor oblika.

$$\omega \cot \omega + Bi - 1 = 0 \quad (11)$$

Faktor oblika  $E$  je funkcija  $Bi$  broja prema relaciji

$$E = \frac{Bi^{4/3} + 1.85}{\frac{Bi^{4/3}}{E_\infty} + \frac{1.85}{E_0}} \quad (12)$$

gde su:  $E_\infty$  i  $E_0$  - vrednosti faktora oblika kada  $Bi$  teži beskonačnosti, odnosno nuli i računaju se pomoću odnosa dimenzija  $\beta_1$  (odnos druge kraće vrednosti namirnice i vrednosti najkraće dimenzije) i  $\beta_2$  (odnos vrednosti najduže dimenzije namirnice i vrednosti najkraće dimenzije).

### 3.2. Uprošćeno određivanje vremena zamrzavanja

Ukupno vreme zamrzavanje namirnice može se podeliti na tri konačna vremenska perioda:

I. period opadanja temperature namirnice do početka fazne promene

II. period fazne promene na temperaturi  $T_f$  (počinje u trenutku kada površinski slojevi namirnice počnu da se zamrzavaju, a prestaje u trenutku kada se centar namirnice potpuno zamrzne)

III. period daljeg opadanja temperature ispod temperature  $T_f$

Jednu od najpoznatijih i do danas najprimenjivanih metoda za uprošćeno određivanje vremena zamrzavanja je Plankova [2] metoda iskazana relacijom (13). Ova metoda pretpostavlja postojanje konvektivnog prelaza toplote sa namirnice na okolni medijum (ambijent) temperature  $T_a$ , uzimajući da je temperatura namirnice  $T_f$  tokom celog procesa zamrzavanja konstantne vrednosti (kao i na početku procesa). Relacija glasi:

$$\theta = \frac{r_f}{T_f - T_a} \left[ \frac{P \cdot d}{\alpha} + \frac{R \cdot d^2}{\lambda_s} \right] \quad (13)$$

gde su:  $r_f$  - toplota promene faze;  $d$  - debljina ploče ili prečnik cilindra (sfere);  $P$  i  $R$  su Plank-ovi geometrijski faktori;  $\alpha$  - koeficijent prelaza toplote;  $\lambda_s$  - koeficijent provođenja toplote potpuno zamrznute namirnice.

Međutim, Plankova relacija (13) daje zadovoljavajuće rezultate jedino ako se primenjuje za određivanje vremena trajanja fazne promene. Ukoliko se primeni na sva tri perioda zajedno može doći i do odstupanja 30% od stvarnog vremena. Do ovakvih odstupanja dolazi usled nemogućnosti da se analitički opiše proces zamrzavanja koji uključuje sva tri perioda istovremeno. Proces zamrzavanja hrane je daleko složeniji od procesa zamrzavanja vode, jer voda u hrani prolazi kroz faznu promenu neravnomerno i u relativno širokom opsegu temperatura [4].

Od ostalih metoda predviđanja vremena zamrzavanja koje se danas koriste, može se izdvojiti relacija (14) Pham-a [4] koja sa zadovoljavajućom tačnošću od  $\pm 10\%$  računa traženo vreme objedinjujući sva tri perioda:

$$\theta = \frac{L}{E \cdot \alpha} \left( \frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2} \right) \left( 1 + \frac{Bi}{2} \right) \quad (14)$$

gde su:  $L$  - karakteristična dužina;  $\Delta H_1$  i  $\Delta T_1$  - promena entalpije i temperature u I periodu;  $\Delta H_2$  i  $\Delta T_2$  - promena entalpije i temperature kombinovano za I i II period,  $E$  - faktor oblika;  $\alpha$  - koeficijent prelaza toplote.

#### 4. PRIMER ODREĐIVANJA VREMENA HLAĐENJA KOD TEHNOLOGIJE PRIPREME JOGURTA DVOFAZNIM HLAĐENJEM

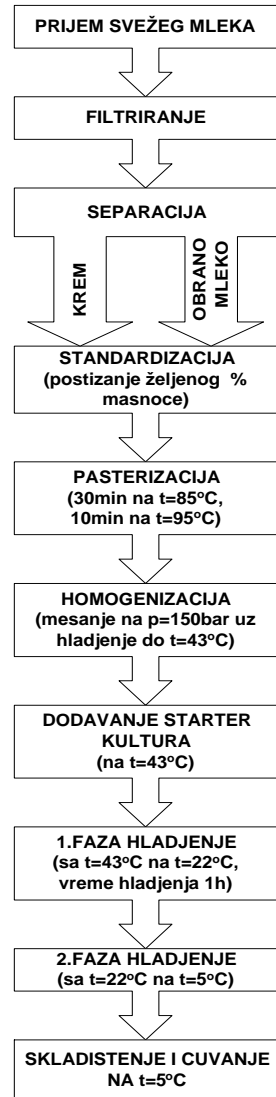
Nastajanje novih tehnologija u pripremi i obradi mleka, diktiranih porastom potrošnje mleka i mlečnih proizvoda, čini mlekarsku industriju dinamičnijom i kompleksnijom. Kako su mleko i mlečni proizvodi lako kvarljivi, kvalitet istih zavisi od tehnologije njihove pripreme i konzervacije pod precizno definisanim temperaturnim uslovima. Ovo dalje uslovljava kvalitet, složenost i efikasnost rashladne instalacije kao bitne karike u lancu pripreme kvalitetnog proizvoda.

Radi tačnog definisanja projektnog zadatka potrebno je poznavati tehnološke zahteve i na osnovu njih odrediti sve potrebne ulazne proračunske parametre.

Na primeru prve faze tehnologije konzervacije jogurta dvofaznim hlađenjem, u skladu sa tehnološkim algoritmom [1] prikazanim na slici 2, razmotriće se tehničko rešenje komore za brzo rashlađivanje [10,11] sa aspekta mogućnosti izbora adekvatne metode termodinamičkog proračuna vremena hlađenja prema odgovarajućoj tehnološki zahtevanoj dinamici hlađenja.

Dodavanjem starter kultura na temperaturi od 43°C pokreće se proces fermentacije koja se u prvoj fazi hlađenja posle jednog časa vremena usporava na temperaturi od 22°C a u drugoj fazi hlađenja zaustavlja na skladišnoj temperaturi od 5°C.

Na osnovu tehnološki zahtevane dinamike hlađenja proizilaze ulazni podaci temperatura i vremena odvijanja procesa u komorama za brzo ohlađivanje. Osnovni zadatak je definisan tehnološkim zahtevom da pad temperature od  $\Delta t = 21^\circ\text{C}$  na proizvodu u vremenskom intervalu od najduže 1 čas radi pravovremenog usporavanja procesa fermentacije jogurta. Kontrolni parametar efikasnosti procesa rashlađivanja jogurta je tražena PH vrednost proizvoda.



Slika 2. Tehnološki algoritam proizvodnje jogurta [1]

Prva faza hlađenja odvija se u malim komorama za brzo hlađenje (slika 3) koje su smeštene unutar velike komore za skladištenje proizvoda (slika 4) u kojoj će se potom odvijati druga faza hlađenja na temperaturi od 5°C.

Ovaj podatak je bitan zbog definisanja uslova okruženja važnih za formulisanje graničnih uslova koji utiču na proračun toplotnog opterećenja malih komora.

Geometrija palete (slika 5) upakovanog jogurta takođe je važan parametar proračunu od koga će direktno zavisiti brzina rashlađivanja same palete.

Bitan uticaj na sam proces hlađenja imaju geometrija kartonske ambalaže u kojoj je jogurt upakovan, veličina otvora koji na njoj postoje, veličina plastičnih čaša ( $\phi 63 \times 55$  mm).

Prostrujavanje hladnog vazduha u horizontalnom i u vertikalnom pravcu kroz paletu bi bilo daleko bolje ukoliko bi se uklonio celofanski omotač koji obmotava paletu (slika 5). On predstavlja veliku prepreku prostrujavanju ali je neophodan zbog stabilnosti palete prilikom transporta.

Paleta se i u malim komorama za brzo hlađenje i u velikoj skladišnoj komori postavlja na šuplje drveno postolje. Na taj način ona je drvenim gredicama izdignuta od poda za 150 mm čime je omogućeno prostrujavanje hladnog vazduha i ispod palete što doprinosi bržem hlađenju proizvoda koji je na taj način sa svih strana opstrujavan hladnim vazduhom.

U maloj komori se osim paleta nalaze još i po dva hladnjaka vazduha (isparivača) simetrično raspoređena (slika 6). Hladan vazduh se distributivnim elementima (kanalima) sprovodi i usmerava kroz otvore dimenzija 2200x70 mm (po pet otvora na kanalu sa leve i desne strane komore). Od geometrije kanala za distribuiranje vazduha, rasporeda i veličine otvora zavisi i karakter opstrujavanja paleta, tj. kompletna strujna slika vazduha u komori [10].

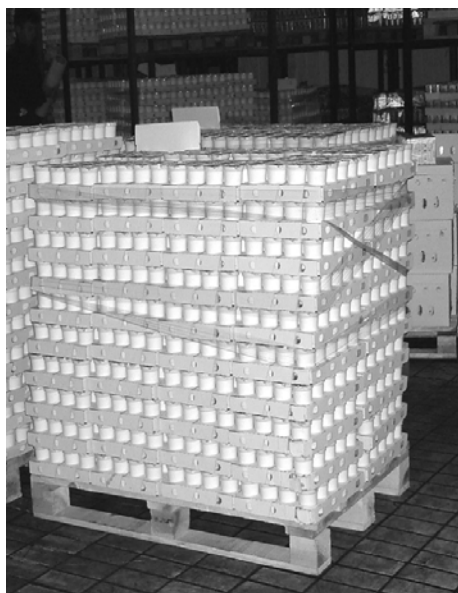
Sve termomehaničke osobine jogurta (kao namirnice) i vazduha (kao medijuma, sredine) definisane su u tabeli 1.



*Slika 3. Spoljni izgled komora za brzo hlađenje [11]*



*Slika 4. Unutrašnjost velike skladišne komore [11]*



Slika 5. Spoljni izgled palete jogurta [11]



Slika 6. Unutrašnjost komore [11]

Tabela 1. Termomehaničke osobine supstanci [1,6,7,8]

Fluid			Vazduh	Jogurt
Temperatura	$t$	[°C]	0	22
Gustina	$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	1.276	1033
Specifična toplota	$c$	[kJ/(kg·K)]	1.007	3.9
Toplotna provodljivost	$\lambda$	[W/(m·K)]	0.024	0.17
Dinamička viskoznost	$\mu$	[Pa·s]	1.711	107

Na osnovu prethodno sprovedenog proračuna toplotnog opterećenja komore, čiji su rezultati dati u tabeli 2, utvrđen je rashladni kapacitet instalacije [10], odnosno, potrebni uslovi ambijenta (održavana temperatura unutar rashladne komore) kako bi brzina hlađenja proizvoda bila u skladu sa zahtevanom.

Tabela 2. Toplotno opterećenje rashladne komore [9]

Toplotno opterećenje	[kW]	$\Phi_{UK} = \sum_{i=1}^8 \Phi_i$
- usled prodiranja toplotne struje	$\Phi_1$ 0.792	43.2 kW
- usled rashlađivanja i zamrzavanja proizvoda	$\Phi_2$ 41.15	
- usled provetranja i infiltracije spoljašnjeg vazduha	$\Phi_3$ 0.32	
- usled odvijanja bioloških proesa u uskladištenim uslovima	$\Phi_4$ 0	
- usled stvaranja inja na isparivačima	$\Phi_5$ 0.015	
- usled rada ljudi	$\Phi_6$ 0	
- usled osvetljenja	$\Phi_7$ 0	
- usled rada ventilatora	$\Phi_8$ 0.92	



#### 4.1. Proračun vremena hlađenja metodom $f$ i $j$ faktora

Koristeći raspoložive podatke može se sprovesti proračun vremena hlađenja prema metodi  $f$  i  $j$  faktora. Ulazni podaci za ovu metodu i odgovarajući međurezultati koji se dobijaju su:

- dimenzija čaše jogurta,  $\phi 63 \times 55$  mm
- najkraće rastojanje između centra i površine čaše,  $L = 0.0275$  m
- površina minimalnog poprečnog preseka koji sadrži  $L$ ,  $A_1 = 0.02375$  m<sup>2</sup>
- površina popr.seseka koji je ortogonalan na  $A_1$  i sadrži  $L$ ,  $A_2 = 0.003025$  m<sup>2</sup>
- Biotov broj,  $B_i = 1.368$
- vrednost geometrijskog indeksa,  $G = 0.856$
- karakteristična vrednost,  $M_1^2 = 1.48$
- faktor,  $f = 13169$
- faktor,  $j = 0.842$
- bezdimenziona temperaturska razlika,  $Y = 0.465$

Vreme hlađenja jogurta računa se prema relaciji (3) i iznosi  $\theta = 56.58$  minuta .

#### 4.2. Prorčun vremena hlađenja $EHTD$ metodom

Ulazne podatke  $EHTD$  metode i odgovarajuće međurezultate koji se dobijaju predstavljamo na sledeći način:

- radijus čaše,  $L = 0.0275$  m
- Biotov broj,  $B_i = 1.368$
- vrednost veličine  $\omega = 1.776$
- vrednosti faktora oblika kada  $Bi$  teži beskonačnosti,  $E_\infty = 2.04$
- vrednosti faktora oblika kada  $Bi$  teži nuli,  $E_0 = 2.74$
- odnos druge kraće vrednosti namirnice i najkraće dimenzije,  $\beta_1 = 1.15$
- odnos najduže dimenzije namirnice i najkraće dimenzije,  $\beta_2 = 1.15$
- faktor,  $j = 0.842$
- bezdimenziona temperaturska razlika,  $Y = 0.465$

Vreme hlađenja jogurta računa se prema relaciji (10) i iznosi  $\theta = 53.11$  minuta .

## 5. ZAKLJUČAK

Sa aspekta raznolikosti metoda za određivanje vremena hlađenja (zamrzavanja) koje stoje na raspolaganju interesantno je uporediti ih kako međusobno, tako i sa drugim empirijski dobijenim rezultatima i praktično izmerenim podacima (naravno ukoliko su dostupni). Ovo poređenje je od velike praktične pomoći projektantu u sagledavanju kompletnog problema.

Predviđanje vremena hlađenja (zamrzavanja) nosi sa sobom i niz grešaka koje se javljaju iz više razloga: greške pri aproksimaciji krive hlađenja  $f$  i  $j$  faktorima; greške prilikom utvrđivanja termofizičkih karakteristika namirnice (toplotne difuzivnosti); greške prilikom određivanja koeficijenata prelaza toplote usled postojanja efekata turbulencije, zračenja, isparavanja, itd.; greške usled aproksimacije složene geometrije namirnice (pakovanja), i sl.

Neke od grešaka se mogu eliminisati doslednim korišćenjem analitičkog ili numeričkog računa (metode) dok se ostale mogu jedino iskustveno predvideti. Međutim, bez obzira na eventualna odstupanja rezultata koje daju, uprošćene metode se široko primenjuju u projektantskoj praksi. Naravno, projektantu ostaje da sagleda odstupanje rezultata u zavisnosti od ustupaka i aproksimacija koje je u proračunu činio.

## LITERATURA

- [1] Yogurt Manufacturing Method, University of Guelph
- [2] Cooling and freezing times of foods-Chapter 9, 1997-2000. ASHRAE Refrigeration.
- [3] Methods of precooling fruits, vegetables and cutflowers-Chapter 14, 1997-2000. ASHRAE Refrigeration.
- [4] Tuan Q.Pham, 2002. Calculation of processing time and heat load during food refrigeration, AIRAH Conference, Sydney, Australia.
- [5] Versteeg H.K. and Malalasekera W., 1995. An introduction to computational fluid dynamics; The finite volume method, Longman Group Ltd., England.
- [6] Incropera F.P. and D.P. DeWitt., 1996. Fundamentals of heat and mass transfer, 4th ed. John Wiley and Sons, New York.
- [7] Bošnjaković F., 1976. Nauka o toplini – drugi dio IV prerađeno izdanje, Tehnička Knjiga, Zagreb.
- [8] Milinčić D., Voronjec D., 2000. Termodinamika , III izdanje, Mašinski fakultet, Beograd.
- [9] Markoski M., 2006, Rashladni uređaji, I izdanje, Mašinski fakultet, Beograd.
- [10] Kosi F., Zlatanović I., 2005. Glavni mašinski projekat komora za brzo rashlađivanje jogurta, A.D. Imlek, Padinska skela.
- [11] Zlatanović I., 2005. Fotografije rashladnih komora i skladišta jogurta, A.D. Imlek, Padinska skela.

## **SIMPLIFIED THERMODYNAMIC METHODS FOR CALCULATION OF PROCESSING TIME DURING FOOD REFRIGERATION APPLIED ON TWO-PHASE YOGURT MANUFACTURING TECHNOLOGY**

**<sup>1</sup>Ivan Zlatanović, <sup>2</sup>Franc Kosi**

*<sup>1</sup>Faculty of Agriculture - Belgrade*

*<sup>2</sup>Faculty of Mechanical engineering - Belgrade*

**Abstract:** Good cooling and freezing time estimations and predictions can provide efficient and economic performance of refrigeration system for specific technology demands. This paper will review most common methods in engineering practice used for modeling foods with complex shapes in order to calculate cooling and freezing times of foods. Two-phase yogurt manufacturing technology cold room is analyzed from the different aspects of adequate method selections.

**Key words:** *cooling time, freezing time, modeling methods, heat load, heat transfer, yogurt*