

Prijedlog za rješavanje problema promrzavanja u industriji mesa primjenom grafičke metode na bazi temperaturne funkcije

Zamrzavanje je jedna od najčešće korišćenih metoda konzerviranja mesa i mesnih proizvoda, naročito što u poređenju sa drugim metodama, primjena zamrzavanja vodi do najmanjih promjena u kvalitetu tokom dugotrajnog skladištenja [1].

1. UVODNA RAZMATRANJA

U industriji mesa, često se susrećemo sa problemom hlađenja odrezaka od mesa (npr. bifteka), pri čemu je neophodno izbjeći njihovo promrzavanje. Razlozi za ovo mogu biti različiti. Zahtjeva se da odresci od mesa imaju održivost tokom dužeg vremenskog perioda, a da pri tome ne dođe do mikrobiološkog kvarenja i narušavanja kvaliteta. Kvalitet mesnih odrezaka kod kojih nije došlo do promrzavanja, sigurno je veći od onih kod kojih je postignuto potpuno zamrzavanje [1,2].

Ovo se naročito odnosi na boju zamrznutih mesnih odrezaka i njihovu teksturu. Naime, najveći problem u maloprodaji zamrznutih mesnih proizvoda su promjene u izgledu. Proces zamrzavanja dovodi do promjena u strukturi i boji mišića koje za dovode do pogoršanja izgleda tokom skladištenja i može da prouzrokuje odbacivanje proizvoda od strane kupaca. Navedeni kriterijum prihvatljivosti će važiti i za zamrznute mesne odreske bez obzira da li su prodavani u zamrznutom ili odmrznutom obliku. Nepoželjnije promjena na boji i izdavanje vode nakon odmrzavanja će uticati na prihvatljivost, odnosno neprihvatanje takvih mesnih odrezaka [3,4]. Ove promjene se u određenom opsegu mogu umanjiti primjenom brzih metoda odmrzavanja [5]. Ipak, na taj način je moguće samo umanjiti gubitke ali ne i kontrolisati promjene te je pravilan process zamrzavanja od presudne važnosti za održanje kvaliteta zamrznutih mesnih odrezaka.

U praksi industrije mesa, mesni odresci najčešće se hlade na policama velikih frižidera, odnosno rashladnih vitrina gdje unutar njih vladaju relativno niske temperature (obično od -10°C do -20°C). Prije unošenja u vitrine, odresci obično imaju sobnu temperaturu (početna temperatura t_0) [2].

Čest slučaj u praksi je da odresci imaju određenu debljinu δ koja je znatno manja od njihove širine. Da bi se izbjeglo promrzavanje, neophodno je temperature odreska održavati u određenim granicama. Očigledno, zbog same prirode problema, temperatura po cijelom presjeku odreska ne može biti konstantna. Temperatura u središtu odreska biće veća od temperature na površini. Temperatura površine odreska koja se zahtjeva treba da bude nešto iznad 0°C obično $t_p = 1 \div 2^{\circ}\text{C}$, dok je temperatura u središtu odreska obično $t_m = 6 \div 8^{\circ}\text{C}$ [1,3].

Znači, ni u jednoj tački odreska, temperatura ne bi trebala biti

0°C , niti ispod ove vrijednosti. Razlog za ovo je, kao što je rečeno, izbjegavanje promrzavanja. Znači, ovdje se radi o relativno strogim uslovima, koje nije uvijek jednostavno ostvariti, zbog gornjih ograničenja. Brzina prijenosa toplote kod opisanog problema procesa hlađenja odreska može se ostvariti na primjer promjenom brzine cirkulacionog ventiletilatora. Pri njegovoj većoj brzini obrtanja ostvaruje se veći koeficijent prijelaza toplote α i obrnuto [2,5].

Prema tome da bi se temperature t_p i t_m , koje ovdje predstavljaju ograničenja, održale u unaprijed zadanom intervalu, potrebno je pri hlađenju ostvariti odgovarajući koeficijent prijelaza toplote α .

Iz ekonomskih razloga, pri ovome potrebno je obezbijediti minimalno vrijeme hlađenja τ_h .

Da bi termodinamičke karakteristike (ρ , c_p , λ , α) bile nepromjenjive, potrebno je da odrezak bude homogen. Ovome bi najviše odgovarao biftek [1,4].

Kontrolisana temperatura kod opisanog procesa hlađenja bila bi temperatura na površini odreska t_p koju ćemo smatrati konstantnom.

S obzirom da se radi o veoma složenom problemu u termodinamičkom smislu, neophodno je izvršiti određene pretpostavke. Možemo smatrati da se kroz odrezak odvija provođenje toplote, a na površini se javlja prenošenje toplote konvekcijom.

Isto tako, s obzirom da je debljina posmatranog odreska znatno manja od njegove širine ($\delta \ll d_w$), prijenos toplote se može posmatrati kao jednodimenzionalan, odnosno prijenos toplote kroz ploču kao geometrijsko tijelo.

Analizom posmatranog problema slijedi da je temperatura najmanja na površini (t_p), a najveća u unutrašnjosti odnosno na centralnoj ravni odreska (t_m). Znači temperatura opada od središta prema površini. Ovo se odnosi za neko zadano vrijeme, odnosno za minimalno hlađenje τ .

2. NESTACIONARNO PROSTIRANJE TOPLOTE

Na osnovu drugog principa termodinamike toplota uvijek prelazi sa toplijeg na hladnije tijelo, odnosno od toplijih ka hladnijim slojevima tijela. Za razliku od stacionarnog, kod nestacionarnog prostiranja temperatura se mijenja sa vremenom, npr. kada se neko tijelo povremeno hladi ili zagrijava [6,7].

Za slučaj da u posmatranom tijelu nema nikakvih izvora toplote važi Fourier-ova parcijalna diferencijalna jednačina [6,7]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

gdje je

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left[\frac{m^2}{h} \right] \quad (2)$$

koeficijent temperaturne provodljivosti koji odražava fizička svojstva tijela.

Jednačina (1) može se matematički napisati i kao [3,11]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 \cdot t \quad (3)$$

Za problem hlađenja i zagrijavanja tijela redovno se koristi granični uslov trećeg reda u obliku:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 \cdot t \quad (4)$$

po kome količina toplote koja se sa jedne strane dovodi graničnoj površini jednaka je količini toplote koja se odvodi. Ovdje λ predstavlja koeficijent toplotne provodljivosti, dok je α koeficijent prijelaza toplote a t_p je temperatura površine [6,8].

Pri rješavanju jednačine (3) uzima se da je stalna i poznata temperatura t_c , u kojoj se tijelo nalazi (okolina).

Neka je

$$\theta = t - t_c \quad (5)$$

gdje je t promjenljiva temperatura tijela a t_c temperatura okoline.

Polazeći od (3) i (5) može se napisati [7,11]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 \cdot \theta \quad (6)$$

Parcijalno rješenje jednačine (6) daje se u obliku proizvoda dviju funkcija [11,13]:

$$\theta = f(x, y, z) \cdot \varphi(\tau) \quad (7)$$

Zamjenom (7) u (6) biće [6,8]:

$$\varphi'(\tau) \cdot f(x, y, z) = a \cdot \nabla^2 \cdot f(x, y, z) \cdot \varphi(\tau) \quad (8)$$

Dijeljenjem sa $a \cdot \theta$ dobija se:

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\varphi'(\tau)}{\varphi(\tau)} = \frac{\nabla^2 \cdot f(x, y, z)}{f(x, y, z)} \quad (9)$$

Desna strana dobijene jednačine ne zavisi od τ , a lijeva ne zavisi od $f(x,y,z)$. Ovo je moguće samo pod uslovom da su obje strane jednačine jednake jednoj te istoj konstantnoj veličini, npr. ε^2 , pa se dobijaju dvije obične diferencijalne jednačine [11,13]:

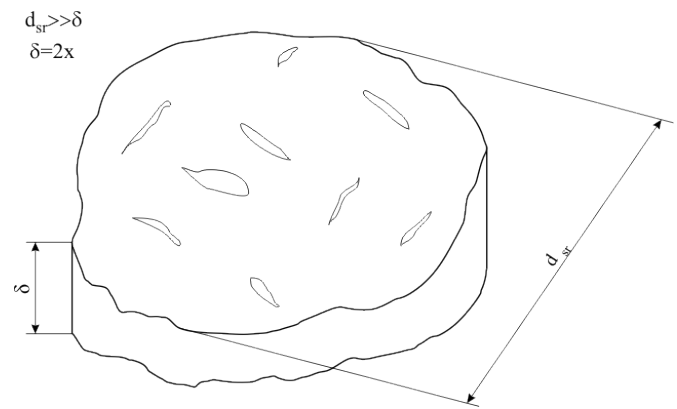
$$\varphi'(\tau) + \varepsilon^2 \cdot a \cdot \varphi(\tau) = 0 \quad (10)$$

$$\nabla^2 \cdot f(x, y, z) + \varepsilon^2 \cdot f(x, y, z) = 0$$

U opštem slučaju sistem jednačina (10), teško se matematički rješava [6,8].

3. PROVOĐENJE TOPLOTE KROZ ODREZAK MESA U OBLIKU RAVNE PLOČE

Odrezak od mesa, kao što je rečeno, možemo posmatrati kao ravnu ploču kod koje je jedna dimenzija znatno veća od druge $d_{sr} \gg \delta$, (slika 1). Ovdje je debljina odreska δ konstantna.



Slika 1: Odrezak mesa kao tanka ravna ploča ($d_{sr} \gg \delta$)

Smatraćemo da odrezak od mesa predstavlja posmatrano tijelo kroz koje se provodi toplota. Da bi se sistem jednačina (10) mogao riješiti, zbog pretpostavke $d_{sr} \gg \delta$, može se smatrati da se promjena temperatura duž osa y i z može zanemariti tj.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 \quad (11)$$

U ovom slučaju prema (10) i (11) može se napisati za jednodimenzionalno provođenje toplote:

$$\varphi'(\tau) + \varepsilon^2 \cdot a \cdot \varphi(\tau) = 0 \quad (12)$$

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} + \varepsilon^2 \cdot f(x) = 0$$

Rješenje jednačine (12) obično se daje kao:

$$\varphi(\tau) = c_1 \cdot e^{-\varepsilon^2 \cdot a \cdot \tau} \quad (13)$$

$$f(x) = c_2 \cdot e^{\pm \varepsilon^2 x}$$

Prema tome, rješenje jednačine za posmatrani uprošćeni slučaj glasi:

$$\theta = c \cdot e^{-\varepsilon^2 \cdot a \cdot \tau} \cdot e^{\pm \varepsilon^2 x} \quad (14)$$

Nestacionarno provođenje toplote kroz odrezak mesa kao ravnu ploču moguće je riješiti analitičkim putem.

Neka odrezak, prema slici 2. ima debljinu $2X=\delta$ i temperaturu t višu od temperature okoline t_c . Ovdje se smatra da se odrezak hladi u sredini čija je temperatura t_m . Odrezak takođe ima potpuno određena fizička svojstva: specifični toplotni kapacitet (c), gustinu (ρ) i koeficijent toplotne provodljivosti (λ), koja ćemo smatrati konstantnim.

Cilj je da se odredi temperaturno polje u odrezku u zavisnosti od vremena hlađenja.

Hlađenje, pa prema tome i temperature, sa obje strane odreska su simetrične.

Na osnovu jednačine (6) a za $\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0$, zbog simetrije hlađenja obje strane odreska, s obzirom da je $t=t_c$, biće

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (15)$$

Diferencijalna jednačina (15), prema [12,13,14], može se integrisati u vidu beskonačnog reda transcendentnih funkcija.

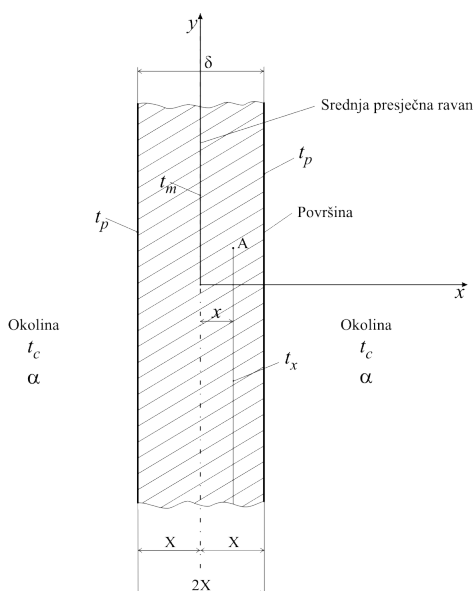
$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \cdot \sin \lambda_n}{2 \cdot \lambda_n + \sin(2 \cdot \lambda_n)} \cdot e^{-\lambda_n^2 \cdot F_0} \cdot \cos \frac{\lambda_n \cdot x}{L} \quad (16)$$

gdje je:

$$\lambda_n \cdot \tan \lambda_n = B_i \quad (17)$$

Pri ovome važi da je:

$$\theta = \frac{t - t_0}{t_c - t_0} \quad (18)$$



Slika 2: Model odreska od mesa kao ravne ploče pri nestacionarnom provođenju toplote

Očigledno, ovdje je t neka karakteristična temperatura dok je t_0 početna temperatura posmatranog tijela u našem slučaju odreska.

Za slučaj $F_0 > 0,2$, za temperaturnu funkciju dobijamo:

$$\theta = \frac{t_{(x,\tau)} - t_c}{t_0 - t_c} = A_1 \cdot e^{-\lambda_1^2 \cdot F_0} \cdot \cos \frac{\lambda_1 \cdot x}{L} \quad (19)$$

gdje je:

$$(A_1, \lambda_1) = f(B_i) \quad (20)$$

U središnjoj ravni odreska za $X=0$, biće:

$$\theta_0 = \frac{t_m - t_c}{t_0 - t_c} = A_1 \cdot e^{-\lambda_1^2 \cdot F_0} \quad (21)$$

Relacije (19), (20) i (21) mogu poslužiti za analitičko rješenje problema hlađenja odreska u industriji mesa. Pri ovome, na bazi postavljenih relacija, postoje određene tabele za brže rješavanje problema [14,15,17].

4. GRAFIČKE METODE ZA RJEŠAVANJE PROBLEMA U TEHNOLOGIJI HLAĐENJA

Na bazi prethodnog izlaganja koristeći prikazani analitički postupak, radi efikasnijeg rješavanja problema zagrijavanja i hlađenja u tehničkoj praksi, razvijen je veći broj grafičkih metoda [4,9,16]. Neke karakteristične od njih biće prikazane u radu posebno sa aspekta njihove primjene u oblasti tehnologije hlađenja.

Nakon određenih složenih matematičkih operacija prema relaciji (16), dobija se razlika temperatura θ , između odreska kao ravne ploče i okoline, nakon vremena hlađenja τ , na udaljenosti x od srednje presječne ravni odreska (slika 2.):

$$\theta = \theta_0 \cdot \Phi \left(\frac{a \cdot \tau}{x^2}, \frac{x}{X}, \frac{\alpha}{\lambda} x \right) \quad (22)$$

Ovde Φ predstavlja navedenu transcendentnu funkciju u obliku beskonačnog reda dok je θ_0 razlika temperatura odreska i okoline u početku hlađenja:

$$\theta_0 = t_0 - t_c \quad (22a)$$

gdje je t_0 početna temperatura odreska.

U jednačini (22), α predstavlja koeficijent prijelaza toplote od spoljašnje površine odreska na okolinu, u kojoj vlada temperatura t_c .

Relacija (22) može se napisati i kao:

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{t - t_c}{t_0 - t_c} = \Phi \left(F_0, \frac{x}{X}, B_i \right) \quad (23)$$

gdje je Furije-ov kriterijum:

$$F_0 = \frac{a \cdot \tau}{x^2} \quad (24)$$

a Bi-ov kriterijum:

$$B_i = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot x \quad (25)$$

Kod prethodne analize (slika 2.), najviša temperatura t_m biće u srednjoj presječnoj ravni, a najniža na spoljašnjoj površini ploče t_p .

Za t_m biće $x=0$, a za t_p biće $x=X$, tako da se na osnovu (23) može napisati:

$$\theta_m = \theta_0 \cdot \Phi_m \left(\frac{a \cdot \tau}{x^2}, \frac{\alpha}{\lambda} x \right) \quad (26)$$

odnosno,

$$\theta_p = \theta_0 \cdot \Phi_p \left(\frac{a \cdot \tau}{x^2}, \frac{\alpha}{\lambda} x \right) \quad (27)$$

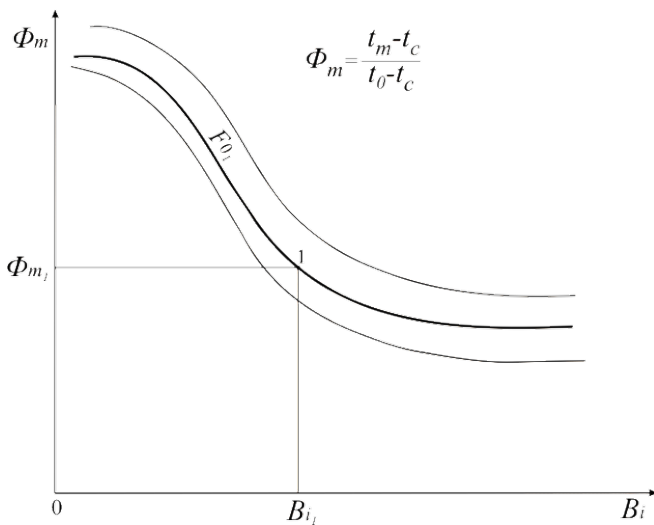
Na osnovu (26), neimenovani temperaturni kriterijum koji određuje temperaturu u središnjoj ravni (jezgru) odredka biće:

$$\Phi_m = \frac{\theta_m}{\theta_0} = \frac{t_m - t_c}{t_0 - t_c} \quad (28)$$

a na osnovu (27) kriterijum koji određuje temperaturu na površini odredka je:

$$\Phi_p = \frac{\theta_p}{\theta_0} = \frac{t_p - t_c}{t_0 - t_c} \quad (29)$$

Na bazi relacija (28) i (29), prema slici 3. i slici 4., konstruisani su dijagrami (Φ_m, B_i) i (Φ_p, B_i) koji predstavljaju temperaturne funkcije u jezgru (središnjoj ravni) i na površini ploče.

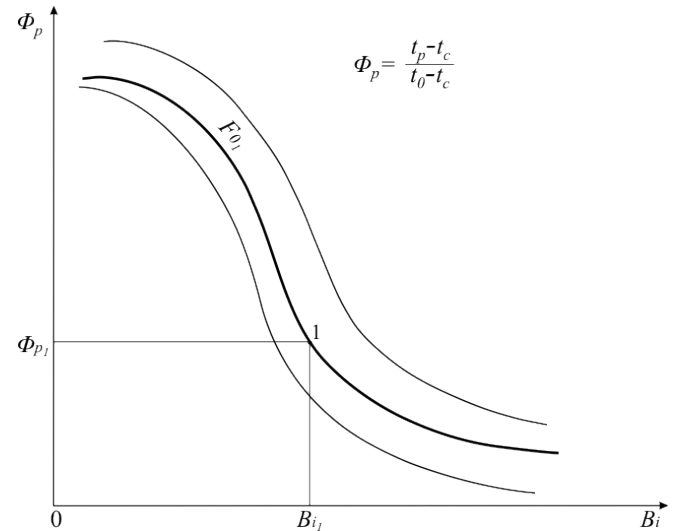


Slika 3: Principijelan prikaz temperaturnih funkcija u jezgru ravne ploče

Prikazani dijagrami, mogu se efikasno iskoristiti za rješavanje mnogih problema u oblasti hlađenja u industriji mesa. Na istim di-

jagramima, dat je prikaz radne tačke 1 koja se nalazi na krivoj F_{01} a kojoj odgovaraju funkcije F_{p1} , odnosno F_{m1} za određeni B_{i1} . Najvažniji parametri koji se na ovaj način mogu odrediti bili bi potrebno vrijeme hlađenja τ , odnosno karakteristične temperature t_p i t_m .

Neki primjeri primjene prikazanih dijagrama, razrađeni su detaljno u radu [9,17].



Slika 4: Principijelan prikaz temperaturnih funkcija na površini ravne ploče

Od praktičnog značaja, pri hlađenju odrezaka u industriji mesa je odvedena količina toplote koja se oslobađa u posmatranom vremenu. Ova količina toplote može se izraziti kao:

$$Q = Q_0 \cdot \Psi(F_0, B_i) \quad (30)$$

Ovde Q_0 predstavlja onu količinu toplote koja se oslobađa hlađenjem odredka od njene početne temperature t_0 na temperaturu okoline. Za određivanje količine toplote, postoje dijagrami slični onima za određivanje θ_m i θ_p [7,9,19].

5. HEISLER-OV DIJAGRAM I MOGUĆNOSTI NJEGOVE PRIMJENE

Na bazi relacije (23), M. P. Heisler je za određivanje funkcija rasporeda temperatura od jezgra ploče do površine, poslije određenog vremena hlađenja odnosno zagrijavanja $\tau = \text{const}$, konstruisao dijagram prikazan na slici 5. [6].

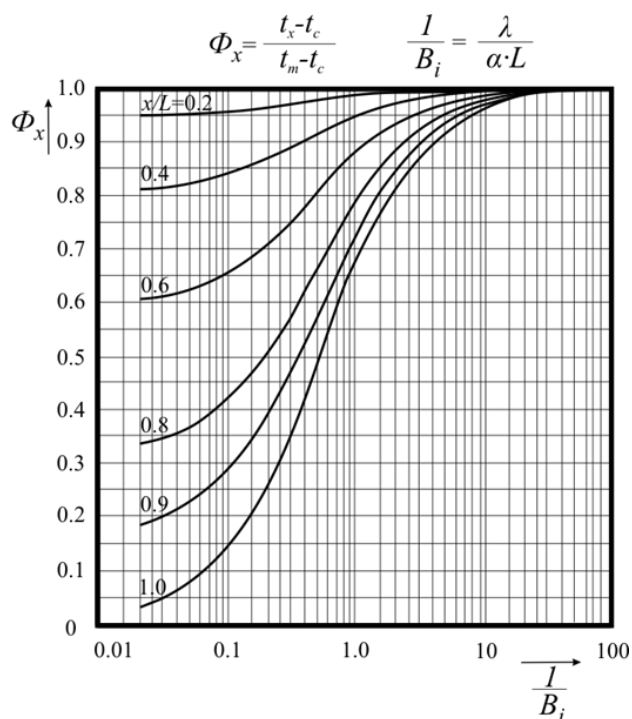
Principijelni primjer primjene Heisler-ovog dijagrama prikazan je na slici 6.

Pri ovome, na ordinati se nanosi funkcija:

$$\Phi_x = \frac{\theta_x}{\theta_m} = \frac{t_x - t_c}{t_m - t_c} \quad (31)$$

a na apscisi recipročna vrijednost Bi broja:

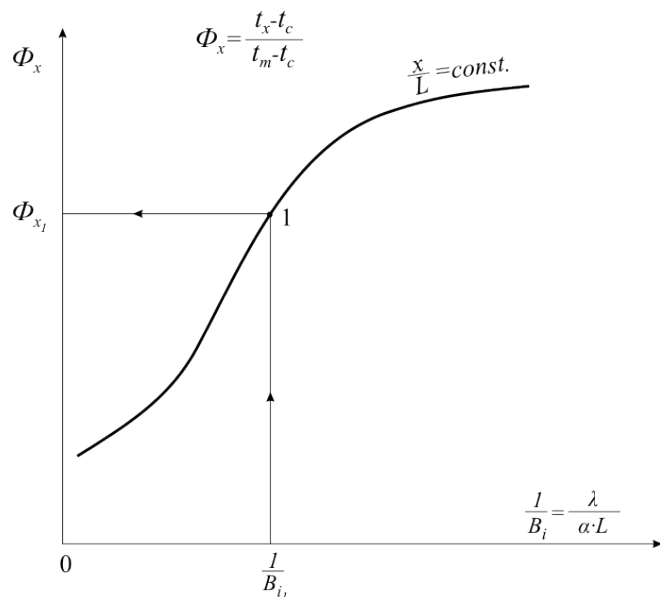
$$\frac{1}{B_i} = \frac{\lambda}{\alpha \cdot L} \quad (32)$$



Slika 5: Heisler-ov dijagram raspodjele temperatura za beskonačnu ploču [6]

Konstruisani dijagram važi za ravnu ploču kod koje je jedna dimenzija u odnosu na drugu znatno veća.

Kao što će se kasnije pokazati, Heisler-ov dijagram je pored ostalog pogodan za rješavanje problema promrzavanja odreska koji je tema rada.

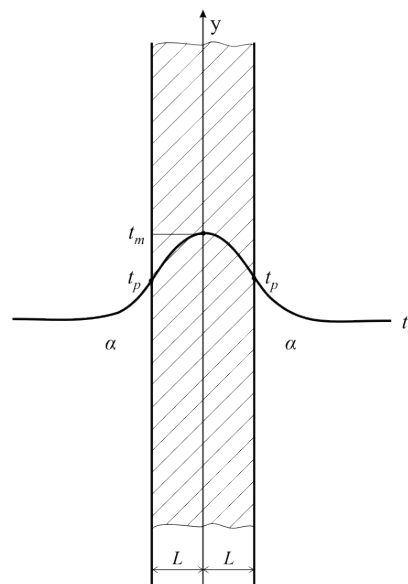


Slika 6: Principijelni primjer primjene Heisler-ovog dijagrama.

S obzirom da se geometrijska veličina x kreće u granicama od $x=0$ (središte odreska) do $x=L$ (površina odreska), to za određeno x i

poznate druge veličine, prema slici 5., moguće je riješiti mnoge probleme iz oblasti hlađenja mesnih odrezaka na efikasan i brz način, s obzirom na veliki broj uticajnih parametara.

Na primjer za poznate veličine t_m , t_c , λ , α , i L , za određeno x , moguće je precizno utvrditi raspored temperature u presječnoj ravni odreska. Ovo se postiže određivanjem funkcije Φ_x (odnosno temperature t_x) za proizvoljnu geometrijsku veličinu x , koja predstavlja udaljenje od središnje ravni (slika 7.).



Slika 7: Principijelni prikaz temperatura u presječnoj ravni odreska od mesa.

6. RAČUNSKI PRIMJER

Razrađeni model ilustriraćemo na jednom praktičnom primjeru hlađenja u industriji mesa.

Neka se u procesu industrije za preradu mesa hlade bifteci tako da se izbjegava njihovo promrzavanje. Debljina pojedinačnih bifteka je 3 cm, dok je njihova početna temperatura 25°C . Bifteci koji su smješteni jedan pored drugog hlade se na polici velikog frižidera (rashladne vitrine) u kome se održava temperatura od -15°C , odnosno na temperaturi ispod 8°C , tako da temperatura ne pada ni u jednoj tački ispod 2°C , iz razloga da bi se izbjeglo promrzavanje.

Brzina prijenosa toplote, odnosno koeficijent prijelaza sa bifteka, mogu se kontrolisati promjenom brzine cirkulacionog ventilatora.

Za zadate uslove, odredićemo koeficijent prijelaza toplote tako da obje gore zadate temperature održavamo u zadatim intervalima ($2 \div 8^{\circ}\text{C}$). Pri ovome potrebno je obezbjediti minimalno vrijeme hlađenja. Biftek ćemo smatrati kao homogeni sloj gdje je njegova debljina znatno manja od širine.

Rješenje

Rješavanje postavljenog problema sprovedimo prema sljedećem redosljedu:

a) Proračunski odnosno geometrijski model

Za zadani primjer, model je prikazan u presjeku prema slici 8., gdje su označeni glavni parametri za proračun.

S obzirom na dimenzije zadatog bifteka $\delta \ll d_{sr}$, provođenje toplote možemo smatrati jednodimenzionalnim. Isto tako smatraćemo da je biftek simetričan u odnosu na centralnu ravan Y. Temperature t_p i t_m su ravnomjerno raspoređene po odgovarajućim površinama.

b) Termofizičke osobine

Za mesne odreske koji se hlade, prema literarnim informacijama [], biće:

- gustina: $\rho=1200$ [KJ/m³]
- specifični toplotni kapacitet: $c_p=4,1$ [KJ/kg°C]
- toplotna provodljivost: $\lambda=0,45$ [W/m°C]

Ove veličine smatraćemo konstantnim (nezavisnim od temperature).

c) Koeficijent temperaturene provodljivosti određujemo prema relaciji (2) kao:

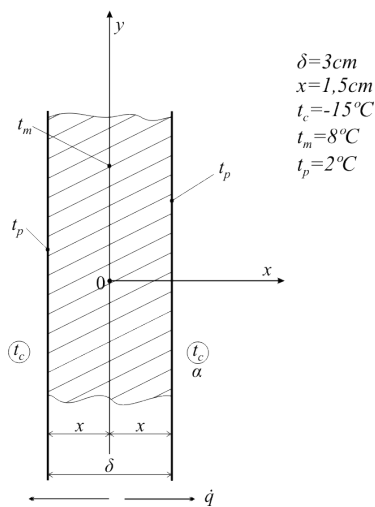
$$a = \frac{k}{c \cdot \rho} = \frac{0,45}{4,10 \cdot 1000 \cdot 1200} = 9,146 \cdot 10^{-8} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (33)$$

d) Geometrijski kriterijum

Za biftek u obliku ravne ploče (slika 8.), zbog $X = \frac{\delta}{2} = x$ biće:

$$\frac{x}{L} = \frac{x}{\delta} = \frac{X}{x} = 1 \quad (34)$$

što važi za površinu bifteka.



Slika 8: Proračunski model bifteka za računski primjer

e) Temperaturni neimenovani kriterijum

Prema (31) biće za temperaturu površine $t_x=t_p$ tj. za $\theta_x=\theta_p$:

$$\frac{\theta_p}{\theta_m} = \frac{t_p - t_c}{t_m - t_c} = \frac{2 - (-15)}{8 - (-15)} = \frac{17}{23} = 0,74 \quad (35)$$

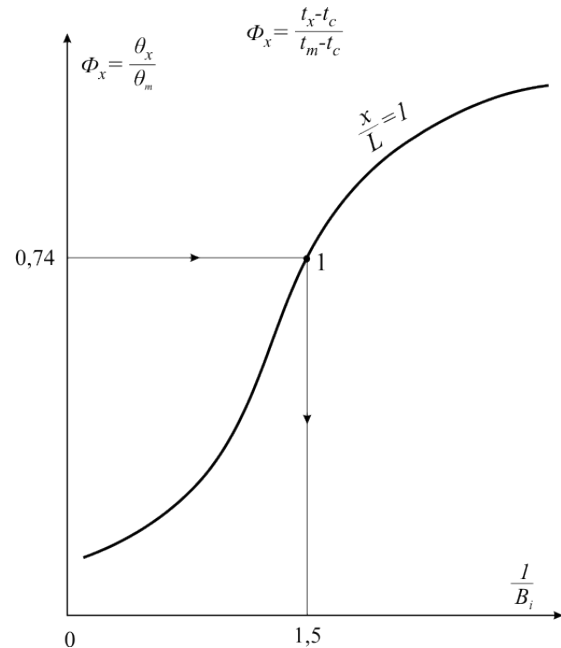
gde je t_c temperatura sredine odnosno okoline u kojoj se bifteci hlade, a t_m temperatura u srednjoj ravni.

f) Recipročna vrijednost Bi kriterijuma

Koristeći Heisler-ov dijagram (slika 9.), grafičkim postupkom za $\Phi_x = \Phi_p = 0,74$ prema slici 9., određujemo da je

$$\frac{1}{B_i} = 1,5 \quad (36)$$

Ova vrijednost odgovara površini odreska $x/L=1$, zbog $x=L$.



Slika 9: Principijelni prikaz primjene Heisler-ovog dijagrama za računski primjer

g) Koeficijent prijelaza toplote (konvekcijski)

Prema definiciji B_i kriterijuma, relacija (25) biće:

$$B_i = \frac{\alpha \cdot \delta}{\lambda} \quad (37)$$

Recipročna vrijednost ovog kriterijuma biće:

$$\frac{1}{B_i} = \frac{\lambda}{\alpha \cdot \delta} \quad (38)$$

S obzirom da je ova vrijednost određena grafički prema (36), biće:

$$\frac{\lambda}{\alpha \cdot \delta} = 1,5 \quad (39)$$

Odavde slijedi da je traženi koeficijent prelaza toplote:

$$\alpha = \frac{\lambda}{1,5 \cdot \delta} = \frac{0,45}{1,5 \cdot 0,015} = 20 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \quad (40)$$

h) Minimalno vrijeme hlađenja

Polazeći od uslova koji važi za Heisler-ov dijagram s obzirom na Furije-ov kriterijum, dobijamo minimalno vrijeme potrebno za hlađenje odrezaka (poglavlje 3.):

$$F_0 > 0,2 \quad (41)$$

$$F_0 = \frac{a \cdot \tau}{L^2} > 0,2 \quad (42)$$

Odavde traženo vrijeme hlađenja iznosi:

$$\tau > F_0 \cdot \frac{L^2}{a} \quad (43)$$

odnosno za $F_0 \geq 0,2$, kao granični slučaj biće:

$$\tau \geq 0,2 \cdot \frac{0,015^2}{9,03 \cdot 10^{-8}}$$

$$\tau \geq 498 s \geq 8,3 \text{ min}$$

odnosno,

$$\tau_{\min} = 8,3 \text{ min}$$

i) Diskusija rezultata

Izračunati koeficijent prijelaza toplote $\alpha=20[W/m^2C]$ obezbjeđuje minimalno vrijeme hlađenja τ_{\min} .

Cirkulacioni ventilator mogao bi raditi i sa manjim koeficijentom prijelaza toplote od izračunatog, ali bi se u tom slučaju produžilo vrijeme hlađenja.

ZAKLJUČAK

Preporučena grafička metoda na bazi Hesler-ovog dijagrama u odnosu na analitičku metodu je efikasnija, brža i preglednija uz nešto manju tačnost, koja ukoliko se ispravno sprovodi može biti dosta visoka. Isto tako metoda je pogodna za praćenje, komparaciju i optimizaciju različitih procesa hlađenja u industriji mesa. Pri ovome treba voditi računa o uslovima pod kojima je dijagram konstruisan s obzirom na F_0 broj.

Predloženom metodom na jednom dijagramu, prati se veliki broj uticajnih parametara hlađenja što u odnosu na analitičku metodu omogućuje efikasniju analizu procesa. Metoda je posebno pogodna kada su u pitanju „brze“ analize bez detaljnih proračuna. Isto tako omogućeno je praćenje temperatura po cijelom presjeku odreska što je otežano kod drugih metoda.

Prikazani rad se može smatrati opštim modelom koji se, kao što je pokazano, može efikasno primjeniti kod rješavanja mnogih problema u tehnologiji hlađenja odrezaka u industriji mesa. Pri ovome jedan parametar je uvijek nepoznat dok svi ostali parametri moraju biti poznati.

Temperature na površini i u jezgri odreska, koje se održavaju prema zadatim vrijednostima, moguće je postići i sa manjim koeficijent-

tom prijelaza toplote. Ovo se ne preporučuje jer u tom slučaju vrijeme hlađenja biće veće što s obzirom na ekonomiju nije pogodno. Znači najefikasnije je postizanje minimalnog vremena hlađenja, što treba da bude i cilj.

Za slučaj da se u tehnologiji hlađenja odrezaka, za rješavanje problema primjenjuje analitički postupak, predložena grafička metoda može poslužiti za kontrolu dobijenih rezultata.

Kao što je poznato mnogi termofizički parametri (posebno λ i α) zavise od temperature što za tačnije proračune i velike temperaturske razlike treba uzeti u obzir. Isto tako za dobijanje realnih rezultata, treba obratiti pažnju da se pri proračunu usvoje njihove pouzdane i provjerene vrijednosti.

Nestacionarni procesi su za istraživanje mnogo složeniji od stacionarnih procesa. Prikazana metodologija u radu u tehničkoj praksi se uglavnom primjenjuje kod procesa zagrijavanja. Pokazano je da se ista može efikasno primjeniti i u procesima hlađenja, gdje se moraju uvažavati određene specifičnosti.

Literatura

- [1] **Toldrá F.** (2010), *Handbook of Meat Processing*, A John Wiley and Sons, Inc., Publication New York.
- [2] **Kerry P. Joseph, Kerry F. John, David Ledward** (2002), eds. *Meat processing*, Improving quality. Elsevier.
- [3] **Jeremiah L. E.** (1982), *The effects of frozen storage and thawing on the retail acceptability of ham steaks and bacon slices*, Journal of Food Quality, (5.1), 43-58.
- [4] **Wheeler T. L., et al.** (1990), *Palatability of chilled and frozen beef steaks*, Journal of Food Science, (55.2), 301-304.
- [5] **Janet S. Eastridge, Brian C. Bowker** (2011), *Effect of rapid thawing on the meat quality attributes of USDA select beef strip loin steaks*, Journal of food science, (76.2).
- [6] **Jakob M.** (1986), *Heat Transfer*, Volume I, II, New York.
- [7] **Fary Ch.** (1982), *Elements de Thermodynamique*, Paris.
- [8] **Mc Adams W. H.** (1979), *Heat Transmission*, New York.
- [9] **Pejović B., Mičić V., Begić S., Vujadinović D.** (2014), *Possibility of using Fourier's differential equation in cooling process of meat steaks*, Quality life, (5) (1-2), 53-67.
- [10] **Zamansky M.** (1989), *Heat and Thermodynamics*, PFK, New York.
- [11] **Tomić M.** (2010), *Parcijalne diferencijalne jednačine*, MF I. Sarajevo.
- [12] **Edition T.** (2007), *Heat and mass transfer*, Mc Graw Hill, New York.
- [13] **Allendoerter** (1985), *Principles of mathematics*, BCH, New York.
- [14] **Baehr H. D.** (2003), *Thermodynamik*, Springer-Verlag, Berlin.
- [15] **Büki G.** (1997), *Energetika*, MK, Budapest.
- [16] **Rant Z.** (1993), *Termodinamika- knjiga za uk i prakso*, Univerzitet u Ljubljani, Ljubljana.
- [17] **Pantelić I.** (1994), *Tehnologija termičke obrade čelika*, RU R. Čirpanov, Novi Sad.
- [18] **Molki M., Sparrow E. M.** (1986), *An Empirical Correlation for the Average Heat Transfer Coefficient in Circular Tubes*, Journal of Heat Transfer, (108), 482-484.
- [19] **Kakac S., Yener Y.** (1985), *Heat Conduction*, New York: Hemisphere Publishing Co.